

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Studium vlivu fyzikálně - mechanických procesů na topografii
povrchu při laserovém obrábění materiálů**

**A Study of the Influence of Physical Mechanical Processes on Surface
Topography in Laser Machining of Materials**

Student: Marek Šafář

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání bakalářské práce

Student:

Marek Šafář

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Studium vlivu fyzikálně-mechanických procesů na topografii povrchu
při laserovém obrábění materiálů
A Study of the Influence of Physical Mechanical Processes on Surface
Topography in Laser Machining of Materials

Zásady pro vypracování:

1. Prostudovat základní literaturu a provést literární rešerši.
2. Úvod do problematiky laserového obrábění.
3. Studium základů technologie laserového obrábění.
4. Studium vlivu fyzikálně-mechanických procesů při laserovém obrábění materiálů.
5. Současné metody hodnocení topografie povrchu.
6. Návrh experimentů.
7. Měření a vyhodnocení dat.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BUMBÁLEK, B.; OBVODY, V.; OŠŤÁDAL, B. *Drsnost povrchu*. Praha, SNTL, 1989.
- [2] MAŇKOVÁ, I. *Progresivne technológie*. Viena Košice, 2000, s. 275, ISBN 80-7099-430-4.
- [3] MLČOCH, L.; SLIMÁK, I. *Řízení kvality a strojírenské metrologie*. Praha, SNTL, 1987.
- [4] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABÁČEK, M. *Řízení kvality a strojírenské metrologie*. Praha, SNTL, 1987.
- [5] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pojmy, definice a parametry struktury povrchu*. 1997.

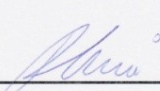
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.**

Datum zadání: 12.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015




Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty


Poděkování

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Janu Valíčkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracování bakalářské práce.

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě


.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- Jsem byl seznámen s tím, že se na moji bakalářskou práci plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že

- Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3);
- odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Souhlasím s tím, že

- bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden její výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce;
- údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, a to v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě :.....



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Marek Šafář

Adresa trvalého pobytu autora práce: Krumpach 29, Zábřeh 78901

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Šafář, M. Studium vlivu fyzikálně - mechanických procesů na topografii povrchu při laserovém obrábění materiálů: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2015, 45 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.

Bakalářská práce je zaměřena na vysvětlení technologie obrábění laserovým paprskem a na topografii povrchu vzniklého při řezání laserovým paprskem. Tato práce se zaměřuje na charakteristiku materiálu, jeho chemické složení a mechanické vlastnosti, dále na výrobu vzorků technologií laserového řezání a hodnocení těchto vzorků z hlediska topografie povrchu. Na hodnocení drsnosti povrchu je použita kvantitativní metoda. Měřicím přístrojem je kontaktní profilometr. Z vybraných parametrů drsnosti jsou následně zhotoveny grafy v závislosti na hloubce h . V závěru práce je naznačena optimalizace řezných parametrů pomocí entropie.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Šafář, M. A Study of the Influence of Physical Mechanical Processes on Surface Topography in Laser Machining of Materials: bachelor thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2015, 45 p. Thesis head: doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.

Bachelor thesis is focused on explaining the technology of laser beam machining and surface topography caused when laser machining. This work focuses on the characteristics of the material, its chemical composition and mechanical properties, subsequent manufacture of laser cutting technology samples and evaluation of these samples in terms of surface topography. The evaluation of surface roughness is quantitative method. The measuring device is a contact profilometer. Some roughness parameters are then made graphs depending on the depth h . At the end is indicated optimization of cutting parameters by using entropy.

Obsah

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	11
Úvod	12
1. Cíl práce	13
2. Princip laseru a základní vlastnosti laserového paprsku	14
2.1 Vlastnosti laserového paprsku	16
2.2 Módová struktura	17
3. Technologie obrábění laserem	19
3.1 Laserové přetavování	19
3.2 Laserové sublimační řezání	20
3.3 Laserové pálení	20
3.4 Interakce laserového paprsku s materiálem	21
4. Typy laserů	22
4.1 Plynové lasery	22
4.1.1. CO ₂ laser	23
4.1.2. He – Ne laser	23
4.1.3. Excimerový laser	23
4.2 Pevnolátkové lasery	24
4.2.1. Nd – YAG laser	24
4.3 Kapalinové lasery	25
4.4 Polovodičové lasery	26
4.5 Vláknové lasery	26
4.6 Požadavky na laserový systém	27
5. Kritéria hodnocení kvality povrchu řezaného laserem	29
5.1 Šířka řezné drážky	30
5.2 Natavení horní hrany	31
5.3 Tekutá struska na spodní straně řezu	31
5.4 Odchylka kolmosti řezné stěny	32
5.5 Drsnost povrchu řezné stěny	32
5.6 Teplem ovlivněná oblast	33
6. Hodnocení topografie povrchu	35
6.1 Metrologie kvality povrchu a jeho parametry	35
6.2 Metody hodnocení a měření topografie povrchu	38
6.2.1. Mechanické metody měření	39

6.2.2.	Optické metody měření	39
6.2.3.	Ostatní metody měření	39
6.3	Metody měření pro řešení experimentální části.....	40
6.3.1.	Surftest SJ – 400	40
7.	Návrh experimentů	42
7.1	Experimentální řezání	42
7.2	Experimentální měření.....	44
7.3	Geometrické parametry drsnosti řezných stěn.....	56
7.4	Analýza topografie povrchu.....	57
8.	Závěr.....	58
	Seznam použité literatury.....	59
	Seznam příloh	60

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma optického rezonátoru [9].....	15
Obrázek 2: Základní parametry při fokusaci [4].....	16
Obrázek 3: Ukázky módové struktury laserů a jejich TEM označení [5].....	18
Obrázek 4: Schéma řezání laserovým paprskem [4]	19
Obrázek 5: Hodnotící kritéria kvality řezu [3].....	30
Obrázek 6: Natavení horní hrany	31
Obrázek 7: Tekutá struska na spodní straně řezu	31
Obrázek 8: Odchylka kolmosti u pro kolmý řez, kde a je tloušťka materiálu.....	32
Obrázek 9: Reliéfy ploch po řezání laserem s různými parametry.....	33
Obrázek 10: Geometrický model povrchu [1]	36
Obrázek 11: Profil povrchu [2]	36
Obrázek 12: Přenosové charakteristiky pro profil drsnosti a vlnitosti [2].....	37
Obrázek 13: Surftest SJ – 400 [8].....	40
Obrázek 14: Dotykový hrot pro hluboké otvory [8]	41
Obrázek 15: Trumpf TruLaser 3030 [11]	42
Obrázek 16: Experimentální vzorky	43
Obrázek 17: Parametry měření Surfes SJ – 401	44
Obrázek 18: Schéma měření kontaktním profilometrem [4].....	45
Obrázek 19: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 1	45
Obrázek 20: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 2	46
Obrázek 21: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 3	46
Obrázek 22: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 4	47
Obrázek 23: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 5	47
Obrázek 24: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 6	48
Obrázek 25: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 7	48

Obrázek 26: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 8	49
Obrázek 27: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 9	49
Obrázek 28: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 10	50
Obrázek 29: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 11	50
Obrázek 30: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 12	51
Obrázek 31: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 13	51
Obrázek 32: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 14	52
Obrázek 33: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 15	52
Obrázek 34: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 16	53
Obrázek 35: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 17	53
Obrázek 36: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 18	54
Obrázek 37: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 19	54
Obrázek 38: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 20	55
Obrázek 39: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 21	55
Obrázek 40: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 22	56
Obrázek 41: Geometrické parametry řezné hrany u řezání CO ₂ laserem [3]	56

Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání CO ₂ laseru a excimerového laseru [5]	24
Tabulka 2: Porovnání CO ₂ laseru a Nd – YAG laseru [5].....	25
Tabulka 3: Technologické podmínky řezání	43
Tabulka 4: Chemické složení oceli ČSN 11375.....	44
Tabulka 5: Mechanické vlastnosti oceli ČSN 11375	44
Tabulka 6: Základní fyzikální vlastnosti oceli ČSN 11375	44
Tabulka 7: Podmínky vyhodnocení měření	45

Úvod

Jeden ze základních technologických směrů v oblasti strojírenského průmyslu se zaměřuje na zvyšování produktivity práce v oblasti obrábění materiálů. Zlepšování procesů obrábění je odezvou na poměrně rychlý vývoj nových druhů materiálů. Z hlediska obrábění nových druhů materiálů si v dnešní době získaly významné postavení nekonvenční metody obrábění. Jejich uplatnění lze nalézt zejména v oblasti těžkoobrobitelných materiálů, které jsou charakterizovány zejména vysokou tvrdostí, odolností proti opotřebení, žáruvzdorností, ale i křehkostí. Důležitou technologií v tomto směru je obrábění laserovým paprskem. Tato technologie má ve strojírenském průmyslu dominantní postavení, zejména z hlediska kvality obrobené plochy, rychlosti obrábění, efektivnosti a ekologičnosti. Kvalita obrobené plochy je předmětem mnoha studií, vycházejících z požadavků technické praxe.

Tato bakalářská práce je zaměřena na vysvětlení technologie obrábění laserovým paprskem a na topografii povrchu vzniklou po řezání laserovým paprskem. Dále se tato práce zaměřuje na charakteristiku materiálu, jeho chemické složení a mechanické vlastnosti, na hodnocení některých parametrů drsnosti povrchu kvantitativní metodou a na to, jak změna parametrů při řezání laserovým paprskem ovlivňuje topografii povrchu obrobených vzorků.

1. Cíl práce

Analýza topografie povrchu, získaného po obrábění laserem je důležitá jak k definování geometrických parametrů povrchu, tak i k optimalizaci technologických parametrů. Cílem bakalářské práce je příprava vzorků technologií laserového obrábění, měření topografie povrchu těchto vzorků, analýza naměřených dat a jejich následná interpretace a návrh předpokladů optimalizace technologických parametrů pomocí entropie.

Nejdůležitější etapy při řešení předmětného tématu bakalářské práce jsou:

- analýza současného stavu technologie obrábění laserovým paprskem;
- hodnocení topografie povrchu a návrh vhodných měřicích metod topografie povrchu;
- příprava vzorků technologií obrábění laserem;
- měření vzorků a vyhodnocení naměřených dat;
- návrh předpokladů optimalizace technologických parametrů pomocí entropie.

2. Princip laseru a základní vlastnosti laserového paprsku

Princip funkce laseru je možné objasnit na základě kvantové fyziky a modelu atomu. Termín **LASER** je odvozen z anglického názvu **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, který v překladu znamená doslovně „zesilování světla pomocí stimulované emise záření“.

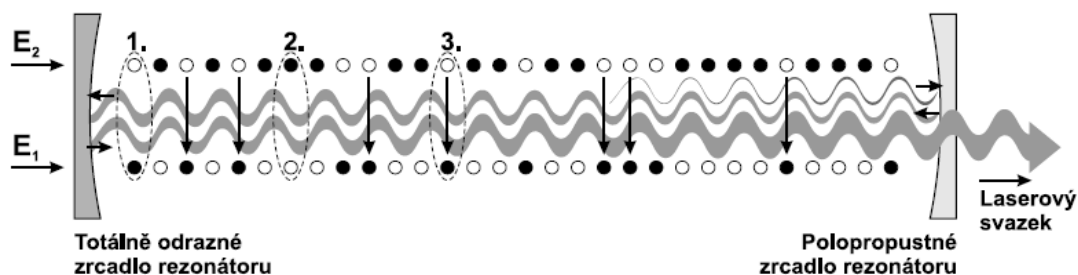
Například sluneční světlo (ultrafialové, viditelné a infračervené) lze považovat za elektromagnetické vlnění, které se šíří všemi směry. Laserové světlo vzniká procesem stimulované emise, který může nastat při vzájemné interakci vybuzeného kvantového systému (atomu, iontu nebo molekuly) s elektromagnetickým zářením – fotonem. Laserové světlo vzniká v prostředí stimulujícího elektromagnetického záření potlačením samovolné (spontánní) emise záření na úkor vynucené (stimulované) emise záření. Samovolná emise záření vzniká tak, že vybuzené atomy s vyšší energetickou hladinou E_2 se snaží zaujmout nižší, stabilnější energetickou hladinu E_1 a při tomto procesu se vyzáří kvantum elektromagnetického záření s frekvencí ν [5].

$$E_2 - E_1 = h \cdot \nu, \quad (1.1)$$

kde $h = 6,62606876 \cdot 10^{-34} \text{ [J} \cdot \text{s]}$ je Planckova konstanta, E_2 a E_1 jsou energetické hladiny kvantových soustav [J], ν je frekvence [Hz].

Existuje velké množství různých typů laserových generátorů, ale každý obsahuje 3 základní součásti: 1. laserové aktivní prostředí, ve kterém se uskutečňuje zesilování záření; 2. zdroj čerpání pro excitaci (vybuzení) aktivního prostředí; 3. rezonátor, který vytváří zpětnou vazbu mezi zářením a aktivním prostředím vedoucí ke vzniku laserových oscilací [9]. Princip laseru tedy spočívá v tom, že zdroj budící energie zajišťuje, aby se v aktivním prostředí vyskytoval dostatek kvantových soustav v excitovaném stavu. Jestliže některá kvantová soustava aktivního prostředí náhodně přejde samovolnou emisí na nižší energetickou hladinu, bude uvolněné kvantum energie ve formě elektromagnetického záření (fotony) stimulovat i další kvantové soustavy k přechodu na nižší energetickou hladinu a emisi fotonů. Část elektromagnetického záření se může kvantovými soustavami znovu absorbovat. Jestliže bude v aktivním prostředí více kvantových soustav v excitovaném stavu (inverze populace hladin), optické záření se bude řetězovou reakcí zesilovat. Samovolná emise se stane zanedbatelnou na úkor emise stimulované

a vygenerované záření bude koherentní a monochromatické. Pro zajištění směru laserového paprsku se aktivní prostředí formuje do tvaru dlouhého válce a je umístěno uvnitř optického rezonátoru. Rezonátor zajišťuje selektivní kladnou zpětnou vazbu kvantového systému, tj. jen rezonující fotony se budou zesilovat. Velikost zpětné vazby je možno nastavit tak, aby byla maximální pro laserový paprsek požadovaných vlastností. Po dostatečném zesílení světla pomocí stimulované emise záření je laserový paprsek z rezonátoru vyveden (obrázek 1) [9].



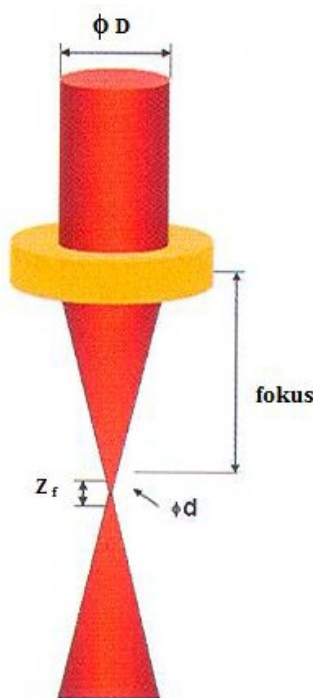
Obrázek 1: Schéma optického rezonátoru [9]

Rezonátor (obrázek 1) je tvořen dvěma rovinnými nebo sférickými zrcadly, která jsou umístěna proti sobě. Jestliže je aktivní prostředí s opačným obsazením hladin uzavřeno v optickém rezonátoru, zpětná vazba laserového záření (odraz zpět od aktivního prostředí) umožní generování elektromagnetických kmitů. Když zesílení světla v aktivním prostředí překročí ztráty při jednom průchodu mezi zrcadly, začne laser emitovat záření s charakteristickou vlnovou délkou pro dané aktivní laserové prostředí. Pro vyvážení laserového paprsku z rezonátoru je jedno ze zrcadel polopropustné. (1.) je kvantová soustava v základním stavu, (2.) je kvantová soustava v excitovaném stavu, (3.) je stimulovaná emise. E_1 a E_2 jsou energetické hladiny kvantových soustav [9].

Vlivem vnějšího podnětu se vybuzený kvantový systém s energetickou hladinou E_2 vrací do základního stavu s energetickou hladinou E_1 . Emituje se nový foton se stejnou frekvencí, jako mělo předcházející kvantum. Tento způsob emise je stimulovaná (vynucená) emise záření. Při běžných podmínkách se kvantový systém nachází v základním stavu. Excitace elektronů ze základní hladiny na vyšší energetickou hladinu doprovází absorpce energie a naopak přechod elektronů z vyšší hladiny na základní energetickou hladinu doprovází emise energie, přičemž vzniká energie ve formě elektromagnetického záření. Laser je tedy v principu kvantově elektronickým zesilovačem a generátorem světelných vln, které mají stejnou vlnovou délku. V závislosti na rozdílu energetických hladin E_1 a E_2 vzniká elektromagnetické záření s různou frekvencí, tudíž i s různou vlnovou délkou [5], [9].

2.1 Vlastnosti laserového paprsku

Laserový paprsek je prostorově koherentní. To znamená, že vlny vyzářené z různých míst aktivního prostředí kmitají ve stejné fázi v rovině kolmé na směr šíření paprsku, tj. mají pevný fázový vztah. Laserový paprsek je rovněž časově koherentní. To znamená, že všechny částice kmitají se stejnou fází ve směru šířícího se paprsku. S tím je spojena vysoká přesnost frekvence záření, takže laserové světlo je monochromatické, tj. vykazuje jen jedinou vlnovou délku. Hodnotu vlnové délky ovlivňuje typ aktivního prostředí, případně rozdíl energetických hladin E_1 a E_2 . Jak je uvedeno výše, přirozené sluneční světlo se šíří všemi směry v prostoru. Laserové záření se však nešíří všemi směry v prostoru, ale v úzkém svazku. Má minimální divergenci (rozbíhavost). Čistě hypoteticky, kdybychom namířili laserovou aparaturu helium-neonového laseru s průměrem paprsku 1 mm na Měsíc, paprsek by na Měsíci zabral průměr 240 mm (při zanedbání fluktuací atmosféry). Laserové záření má také velmi vysokou intenzitu záření s jednotkou měření $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$. Některé typy laserů mohou generovat velmi krátké světelné impulsy. Tyto pulsní lasery mohou v oblasti krátkých vlnových délek uvolnit optický výkon od 10^{10} do 10^{13} W. Signifikantní vlastnosti (koherentnost, monochromaticnost, vysoká intenzita) umožňují laserovému paprsku při jeho fokusaci soustředit do malého bodu velmi vysokou hodnotu energie. Ta má za následek natavení nebo odpaření materiálu (obrázek 2) [5], [7], [9].



Obrázek 2: Základní parametry při fokusaci [4]

Fokusevání paprsku na povrch obráběného materiálu je jeden z parametrů, který jasně ovlivňuje množství užitečné energie dodané na povrch obrobku. Důležité vlastnosti laserového paprsku jsou velikost stopy svazku záření a divergence, kterou lze vyhodnotit [4]:

$$\theta = \frac{4 \cdot \lambda}{\pi \cdot d_m} \quad (1.2)$$

kde θ je divergence (rozbíhavost) laserového paprsku [rad], λ je vlnová délka laserového paprsku [m], d_m je průměr svazku v ohnisku [mm].



















Průměr d_m svazku v ohnisku je

$$d_m = \frac{4 \cdot M^2 \cdot f \cdot \lambda}{\pi \cdot D} \quad (1.3)$$

kde M^2 je faktor kvality paprsku [-], f je ohnisková vzdálenost [mm], λ je vlnová délka laserového paprsku [m] a D je průměr nefokusevaného paprsku [mm].

2.2 Módová struktura

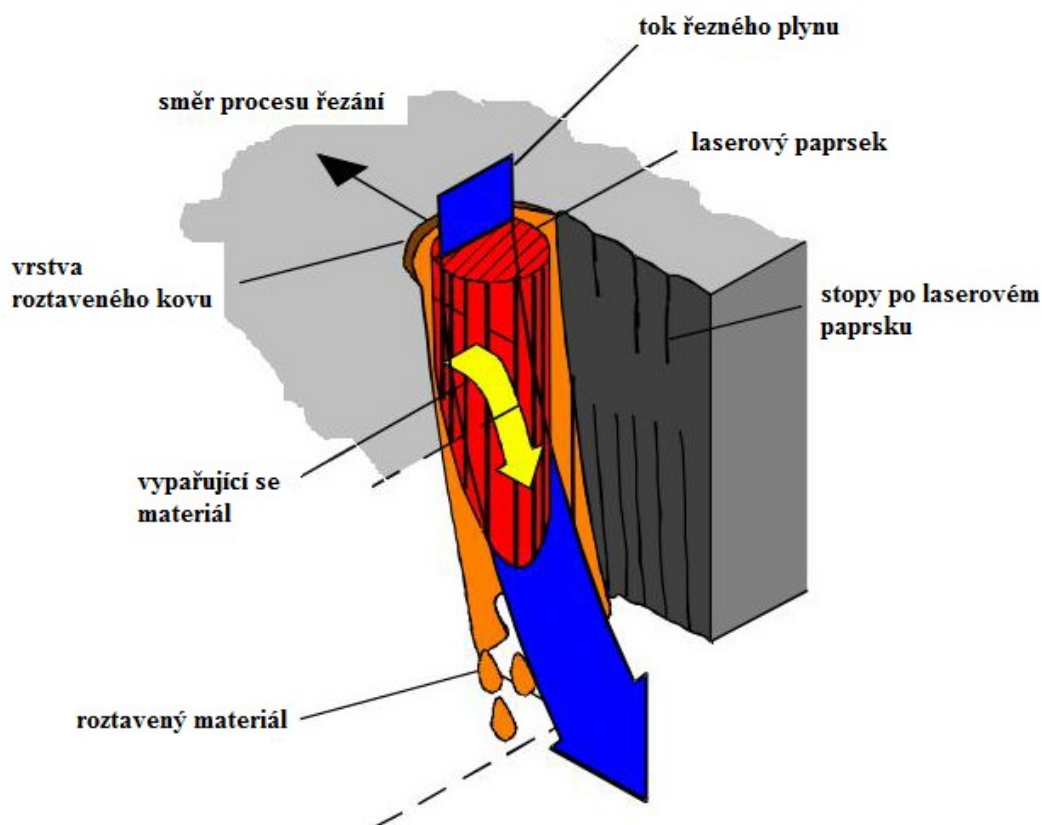
U některých aplikací laserů (svařování, řezání, žíhání) nezpůsobí přítomnost velkého počtu módů žádné potíže. Existuje ale celá řada aplikací laseru, u kterých záleží zejména na „módové čistotě“ generovaného záření. Takové aplikace jsou např. optické komunikace, optický záznam informace, holografie a spektroskopie. Pro takovéto případy je potřeba zajistit generování jen v jednom podélném módu. Je zapotřebí vybrat mód z celého velkého množství všech možných módů laseru. Nejkoncentrovanější energii v okolí osy rezonátoru má základní mód TEM₀₀ (index označuje symetrii elektromagnetického pole v rovině kolmé na směr šíření paprsku). Všechny ostatní módy mají energii rozprostřenou do větší plochy. TEM (transverse electromagnetic mode), paprsek vytváří v příčném průřezu jednoduchou stopu – základní mód, anebo složitější obrazce pravoúhle nebo kruhově symetrické. Je to způsobené tím, že uvnitř laserového rezonátoru získává elektromagnetické pole generované stimulovanou emisí záření určitou konfiguraci neboli mód (obrázek 3). Mód laseru určuje vhodnost laseru pro průmyslové použití, např. pro řezání, svařování, kalení a další technologie [5], [9].

průřez A v rovině kolmé na směr paprsku	průřez B kolmý na A	půdorys	označení TEM (použití)
1 			TEM ₀₀ , Gauss (řezání)
2 			TEM ₀₁ (svařování, kalení)
3 			TEM ₂₁
4 			TEM ₃₂ (málo používané)
5 			multimód (řezání)
6 			multimód (nevhodné pro řezání)

Obrázek 3: Ukázky módové struktury laserů a jejich TEM označení [5]

3. Technologie obrábění laserem

Technologie obrábění laserem spočívá ve fokusaci laserového paprsku na povrch obráběného materiálu. Z důvodu vysoké intenzity laseru se v jednom bodě na povrchu obrobku koncentruje velké množství energie. To má za následek velmi vysokou teplotu, která způsobí roztavení nebo vypaření materiálu. Schéma řezání laserovým paprskem je znázorněno na obrázku 4. Obrábění laserem lze uskutečnit třemi způsoby. Laserovým přetavováním, laserovým pálením a laserovým sublimačním řezáním [4].



Obrázek 4: Schéma řezání laserovým paprskem [4]

3.1 Laserové přetavování

Při laserovém přetavování dochází k ohřevu materiálu nad teplotu tavení. Laserový paprsek se soustředí do ohniska o průměru 0,05 mm až 0,25 mm. Rostavený materiál se z mezery odstraňuje proudem inertního plynu vedeného tryskou koaxiálně s laserovým paprskem. U nekovových materiálů, které dobře hoří (např. polypropylén, PVC atd.) se používají inertní plyny argon nebo dusík. Používají se jako ochrana proti vznícení nebo opálení obráběných hran. Laserové přetavování je charakteristické vysokou rychlostí řezání a nízkou spotřebou energie na jednotku délky řezu. Na řezu jsou vidět stopy po odeírání materiálu. V některých případech jsou viditelné kapky rozstříknutého kovu na

spodní straně obrobku [4]. Jestliže se celý absorbovaný laserový výkon spotřebuje na tvorbu řezné drážky, pak je tepelná bilance odstraněného materiálu vyjádřena prostřednictvím koncentrované tepelné kapacity

$$AP = w \cdot h_m \cdot v \cdot \rho \cdot (C_p \cdot \Delta T + L_m) \quad (2.1)$$

kde A je absorpivita nebo koeficient vazby [-], P dopadající laserový výkon [W], w šířka řezné drážky [mm], h_m tloušťka materiálu [mm], v řezná rychlost [mm.min⁻¹], ρ měrná hmotnost obráběného materiálu [kg.m⁻³], C_p specifická tepelná kapacita obráběného materiálu [J.K⁻¹], ΔT nárůst teploty způsobující tavení [-], L_m latentní teplo tavení [J], [4].

3.2 Laserové sublimační řezání

Laserové sublimační řezání je varianta laserového přetavování, při kterém fokusovaný laserový paprsek zahřívá materiál na teplotu odpaření. Vzniklý odpařený materiál se z řezné mezery odstraňuje proudem inertního plynu z trysky. V porovnání s laserovým přetavováním je výhodou sublimačního řezání úzká řezná mezera a velmi dobrá jakost řezu. Nevýhodou je větší spotřeba energie na jednotku délky řezu [4]. Rychlost pronikání laserového paprsku do obrobku lze odhadnout výpočtem koncentrované tepelné kapacity, a to se zanedbáním vedení tepla

$$V = \frac{F_0}{\rho \cdot [L_m + L_v + C_p \cdot (T_v - T_0)]} \quad (2.2)$$

kde V je rychlost pronikání laserového paprsku do obrobku [mm.s⁻¹], F_0 je absorbovaný výkon laseru [W] $F_0 = AP/(w \cdot d)$, ρ je měrná hmotnost obráběného materiálu [kg.m⁻³], L_v latentní teplo vypařování [J], T_v teplota vypařování [K], T_0 iniciační teplota obrobku [K], [4].

3.3 Laserové pálení

Při laserovém pálení se materiál v místě dopadu laserového paprsku ohřeje na zápalnou teplotu a shoří v proudu aktivního plynu, nejčastěji kyslíku. Oxidační účinek se projevuje počáteční oxidací povrchu a tím zvýšenou schopností materiálu absorbovat energii laseru (sníží se koeficient odrazivosti). Dále se oxidační účinek projevuje vznikem přídavného exotermického tepla hoření, které disponuje velkým zvýšením rychlosti řezání. Proces řezání je důsledkem exotermické reakce materiálu s kyslíkem [4].

3.4 Interakce laserového paprsku s materiálem

Při dopadu laserového záření na obráběný materiál dochází nejdříve k interakci s povrchem materiálu a poté s jádrem materiálu. Energetickou bilanci při interakci laserového záření s materiálem lze vyjádřit kvantitativně

$$(1 - k_r) \cdot P \cdot \tau = \gamma \cdot V \cdot [c_p \cdot (T_t - T_o) + (T_v - T_o)] + L_t + L_v + E_r + E_z \quad (2.3)$$

kde k_r je koeficient odrazu [-], P je výkon laseru [W], τ je doba působení [s], γ je měrná hmotnost materiálu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], V je objem materiálu [m^3], c_p je měrné teplo [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], T_t je teplota tavení [K], T_o je teplota okolí [K], T_v je teplota vypařování [K], L_t je latentní teplo tavení [J], L_v je latentní teplo vypařování [J], E_r je reakční energie v okolí materiálu [J], E_z je ztrátová energie, která se rozptýlí [J], [4].

Z rovnice (2.3) vyplývá, že důležitou úlohu pro energetickou bilanci má koeficient odrazu k_r . Koeficient odrazu představuje část energie, která se při dopadu záření na povrch materiálu odrazí. Koeficient odrazu lze vyhodnotit

$$k_r = \frac{E_r}{E_o} = \frac{I_r}{I_o} \quad (2.4)$$

kde E_r je energie odraženého záření [J], I_r je intenzita odraženého záření [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$], E_o je energie dopadajícího záření [J], I_o je intenzita dopadajícího záření [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$]. Koeficient odrazu k_r je funkcí vlnové délky laserového záření λ , použitého materiálu a drsnosti povrchu [4].

Při dopadu laserového záření na obráběný materiál se část energie odrazí a část je materiálem absorbována. Tato absorbovaná energie poměrně intenzivně zahřívá materiál. Jestliže laserový paprsek působí na materiál, energie tohoto záření je absorbována nejprve volnými elektrony a potom je přenesena do krystalové mřížky. Různé materiály mají různé absorpční schopnosti k laserovým paprskům o různých vlnových délkách. Závislost absorpce na vlnové délce je dána mikrostrukturou a elektromagnetickými vlastnostmi materiálu. Fotony laserového záření nemohou přímo reagovat s atomy na povrchu materiálu, protože mají příliš vysokou frekvenci. Reagují tedy s valenčními elektrony a s krystalickou mřížkou, tím se zvyšuje počet volných iontů a krystalická mřížka se zahřívá [4].

4. Typy laserů

Existuje mnoho různých typů laserů. Základní princip generování laserového záření je stejný, ale konstrukce, typy aktivních prostředí a režimy generování laserového paprsku se liší. Lasery lze dělit podle:

- **skupenství aktivního prostředí** – na lasery pevnolátkové, kapalinové, plynové plazmatické a polovodičové [9];
- **režimu generování laserového paprsku** – na lasery kontinuální a pulzní. Pulzní lasery se mohou dále dělit na lasery pracující v režimu volného generování (délka impulsů řádově 10^{-4} s), lasery pracující v režimu spínání zisku (délka impulsů řádově 10^{-8} s), lasery pracující v režimu synchronizace módů (délka impulsů řádově 10^{-12} s) [9];
- **způsobu čerpání** – na lasery opticky čerpané (koherentně nebo nekoherentně), lasery čerpané elektrickým výbojem, lasery čerpané chemickou reakcí, lasery čerpané elektronovým svazkem atd. [9];
- **frekvenční oblasti** – na lasery submilimetrové, infračervené, viditelné, ultrafialové, rentgenové [9];
- **prostorové struktury laserového svazku** – na lasery jednomódové a lasery mnohamódové [9];
- **rozsahu generovaných frekvencí** – na lasery jednofrekvenční a lasery přeladitelné [9];
- **využitých nelineárních jevů** – na lasery generující na vyšší harmonické frekvenci, lasery se směřováním frekvencí, lasery Ramanovské atd. [9].

Uvedené třídy dělení se neustále mění a doplňují, a to podle toho, jak jsou realizovány nové typy laserů. Jediné univerzální dělení je dělení podle skupenství aktivního prostředí.

4.1 Plynové lasery

Jde o nejširší skupinu laserů s možností generovat záření v celém optickém spektru. Plynné aktivní látky uvnitř laseru mají vysokou optickou homogenitu. To umožňuje využít získání záření většího objemu aktivní látky a dosažení velké intenzity záření a zároveň dosažení malé interakce mezi aktivními částicemi. Plynové lasery pracují hlavně v kontinuálním režimu, ale existují i výkonné pulzní plynové lasery. Velkou výhodou plynových laserů je vysoká účinnost laserového systému pohybující se v desítkách procent

(CO₂ laser – 40 %). Mezi základní typy patří červeně zářící hélium-neonový laser, který byl do nedávna nejrozšířenějším a zároveň prvním vyrobeným laserem. V průmyslu a v medicíně je dnes nejvíce používán CO₂ laser. Pro světelné efekty a pro separaci iontů se používá zeleně a modře zářící argonový laser [4], [9].

4.1.1. CO₂ laser

CO₂ laser patří mezi lasery s nejvyššími dosahovanými výkony. Výkon CO₂ laseru mohou být až desítky kW ve vzdálené infračervené oblasti (10,6 μm). Je to typický laser pro technologické aplikace (řezání, svařování, žíhání). Ke stimulované emisi záření dochází při kvantových přechodech mezi rotačně-vibračními hladinami základního elektronového stavu molekuly CO₂. Atomy helia podporují vyprazdňování spodní laserové hladiny. Ke světelným výrobcům CO₂ laserů patří německá firma TRUMPF a Rofin-Sinar, jejichž výrobní program zahrnuje řadu typů laserových systémů až do výkonu 20 kW. Zajímavou novou technologií řezání křehkých materiálů (sklo, keramika nebo polovodiče) tímto laserem umožňuje laser Jenoptik – Votan G, který využívá k řezání vnitřní napětí materiálu. Patentovaný způsob, označovaný TLS (Termisches Laserstrahl Separieren) je rychlejší než ostatní postupy a na rozdíl od klasického laserového dělení poskytuje povrch řezu bez mikrotrhlinek. Od firmy Ronin - Sinar pocházejí kompaktní "slab CO₂" lasery, dosahující vysokou kvalitou paprsku. Jsou vhodné pro jakostní řezy a nevnaší do materiálu tolik energie ve formě tepla. Teplem ovlivněné oblasti jsou tedy menší. Pro tyto lasery jsou charakteristické velkoplošné měděné elektrody s účinným způsobem chlazení. Dosahují výkon do 8 kW. Tyto lasery jsou vhodné pro mikrořezání a při jejich daném výkonu se přesnost přenáší i na řezání tlustých plechů. Vysoká stabilita procesu a kvalita paprsku poskytují možnost využívat při řezání i vyšších řezných rychlostí [4].

4.1.2. He – Ne laser

Helium – neonový laser je jeden z nejpoužívanějších laserů v oblasti, kde nejsou zapotřebí vysoké výkony např. spektroskopie, metrologie [4].

4.1.3. Excimerový laser

Excimerové lasery patří mezi plynové lasery s krátkou vlnovou délkou a vytváří světelné záření v ultrafialové oblasti a částečně v oblasti rentgenového záření. Pracuje v pulzním režimu s energií impulzu 2 až 8 J·cm⁻². Aktivní látkou je KrF (fluorid kryptonu).

Patří do kategorie vysokorychlých laserů s ultrakrátkým trváním impulsu udávaným v pikosekundách ($1\text{ps} = 10^{-12}\text{s}$) nebo femtosekundách ($1\text{fs} = 10^{-15}\text{s}$). Excimerové lasery patří mezi lasery s nejkratšími možnými impulzy světelného záření. V průmyslu se objevily až na konci 20. Století, a to zejména pro zpracování keramických a kompozitních materiálů, pro oblast mikroobrábění tenkých kovových profilů, pro označování kovových předmětů, na odstraňování nadbytečných materiálů na plošných spojích bez poškození okolí, při mikrořezání měkkých a tvrdých biologických tkání v medicíně [5]. V tabulce 1 je uvedeno porovnání CO_2 a excimerového laseru.

Tabulka 1: Porovnání CO_2 laseru a excimerového laseru [5]

	CO_2 laser	Excimerový laser
Vlnová délka	10,6 μm	193 – 351 nm
Kontinuální režim - střední výkon	< 1500 W	< 150 W
Pulzní režim - střední výkon	$\leq 5 \cdot 10^3$ W	< 10^7 W
Průřez paprsku	250 mm^2	100 mm^2
Divergence paprsku	1,5 mrad	≤ 5 mrad
Mód paprsku	TEM_{00}	multimód
Pulzní frekvence	$\leq 2,5$ kHz	$\leq 0,8$ kHz
Trvání impulsu	10 μs	10 – 80 ns
Účinnost	10 – 30 %	1 %
Rychlost posuvu při řezání kompozitních materiálů	9 m/min pro 500 W 3 m/min pro 1000 W	0,9 mm/min pro 1,1 W

4.2 Pevnolátkové lasery

Aktivní látky pevnolátkových laserů se skládají z matricové látky a aktivní příměsi. Matricová látka může být monokrystalická (Al_2O_3 , CaWO_4 , YAG) nebo amorfni (sklo). Aktivní příměsí tvoří prvky f-skupiny (Nd, Er, Pr, Ho) periodické soustavy prvků nebo prvky ze skupiny železa (Cr, Ti). Nejvýznamnější pevnolátkové lasery jsou červeně zářící rubínový laser, jehož aktivní prostředí tvoří safír obohacený chromem - rubín a nejrozšířenější a nejlépe technicky zvládnutý pevnolátkový laser Nd - YAG laser. Dalšími představiteli pevnolátkových laserů jsou alexandritový laser a Er - YAG laser, které se používají v medicíně [4], [9].

4.2.1 Nd – YAG laser

Nd-YAG laser se skládá z pevného $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (yttrium aluminium granát). Je to izometrický krystal, který obsahuje asi 1 % Nd^{3+} (iontů neodymu). Tepelná vodivost tohoto krystalu je asi 10 krát lepší než tepelná vodivost skla, které se používá u Nd – sklo laseru. Ionty neodymu tvoří oscilační médium a zároveň aktivní prostředí. Tento laser generuje

elektromagnetické záření o vlnové délce 1064 nm v kontinuálním i pulzním režimu. S menší účinností pak generuje záření o vlnové délce 1320 nm. Metodami nelineární optiky lze dosáhnout záření o vlnové délce 532 nm (druhá harmonická frekvence – SGH), popřípadě 355 nm nebo 266 nm (třetí a čtvrtá harmonická frekvence). Při generování záření o vlnové délce 1064 nm dosahuje Nd – YAG laser nejvyšších výkonů. Výkonová hladina laseru při vlnové délce 1064 nm je od několika stovek do tisíce wattů. Pracuje v pulzním režimu s energií impulsu 1 až 50 J nebo v kontinuálním režimu s energií impulsu 1 až 5 mJ a rychlostí spínání 1 až 50 kHz. Trvání impulsu v pulzním režimu pro průmyslové využití je 0,6 ms. Pro ultrapřesné odstraňování tenkých vrstev z keramických materiálů (mikroobrábění) se používají velmi krátce trvající impulzy v nano a piko sekundách. Nd – YAG laser se využívá pro laserové obrábění, značkování, vrtání a svařování. Jeho výhodou je stabilita aktivního prostředí. $Y_3Al_5O_{12}$ je velmi stabilní krystalická látka, která má výborné akumulární schopnosti, což umožňuje generovat krátké vysokovýkonné pulzy [4], [5]. V tabulce 2 je uvedeno porovnání CO₂ a Nd – YAG laseru.

Tabulka 2: Porovnání CO₂ laseru a Nd – YAG laseru [5]

	CO₂ laser	Nd – YAG laser
Vlnová délka	10,6 μm	1064 nm
Aktivní prostředí	CO ₂ plyn	Y ₃ Al ₅ O ₁₂ obohacený 1% Nd ³⁺
Zdroj excitace	výboj	magneziové světlo
Řízení pohybu paprsku	odrazová zrcadla, pevné čočky	flexibilní přes čočky, zrcadla, optické kabely
Maximální hustota toku energie	10,7 W/cm ²	10,9 W/cm ²
Průměr paprsku	100 μm	15 μm
Šířka řezu	2000 μm	30 μm
Elektrická účinnost	8 až 10 %	3 až 4 %
Střední výkon laseru	50 až 50000 W	20 až 3000 W
Mód paprsku	TEM ₀₀	Multimód
Kvalita paprsku	optimální	slábne při vysokém výkonu
Přesnost	střední	vysoká
Doporučené aplikace	řezání, svařování, tepelné zpracování povrchu a jiné povrchové úpravy	řezání, vrtání, svařování, tepelné zpracování povrchu

4.3 Kapalinové lasery

U kapalinových laserů se jako aktivní prostředí používají opticky buzené roztoky organických barviv. Mají široké fluorescenční spektrum, které umožňuje spojitě

přeladovat vlnovou délku záření. Pomocí metod nelineární optiky a několika typů barviv je možno spojitě pokrýt pásmo vlnových délek od 300 nm do 1500 nm. Typický představitel kapalinových laserů je rhodamonový laser. Tento laser generuje pulzní záření o vlnové délce 520 nm až 740 nm, tedy od zelené po červenou oblast viditelného světla. Nevýhodou kapalinových laserů je toxicita a krátká životnost aktivního prostředí, které se rozkládá vlivem tepla a světla. Kapalinové lasery se nahrazují pevnolátkovými lasery [9].

4.4 Polovodičové lasery

V dnešní době je tato skupina laserů nejrozšířenější. Používá se pro ně označení laserové diody (HDL, high – power diode laser). Princip ve vytváření laserového záření se od ostatních laserů liší tím, že nepracují s přechodem elektronů mezi diskrétními hladinami, ale pracují s přechodem elektronů mezi vodivostním a valenčním pásem polovodiče. Jinými slovy mění elektrický proud přímo na elektromagnetické záření. Laserové diody mají velmi malé rozměry. To má za následek větší divergenci výstupního svazku fotonů oproti jiným laserům. U polovodičových laserů lze laserový paprsek snadno modulovat změnou budícího elektrického proudu. Mají vysokou účinnost (až 50 %). Pracují v kontinuálním i pulzním režimu a mohou dosahovat vysokých výkonů. Polovodičové lasery se využívají zejména v telekomunikacích a výpočetní technice. Dnes se také stále častěji používají pro čerpání pevnolátkových laserů a tak vznikají vysoce výkonné flexibilní a miniaturní laserové generátory [4], [9].

4.5 Vláknové lasery

Velmi dobrou alternativou k pevnolátkovému Nd – YAG laseru a k plynovému CO₂ laseru jsou vláknové lasery. Jejich aktivní prostředí tvoří křemíková vlákna obohacená prvky f skupiny (neodym, yterbium, erbium). Vláknové lasery pracují v kontinuálním režimu a generují záření o vlnových délkách 1000 nm až 1500 nm. Jako zdroj čerpání vláknových laserů se používají nízko výkonné laserové diody, které mají dobrou kvalitu laserového svazku, vysokou životnost, účinnost a nízkou cenu. Tyto vlastnosti se přenášejí i na výsledný vláknový laser. Vláknové lasery využívají možnosti paralelního spojení nízko výkonných laserů do jednoho systému. Výkony těchto systémů se mohou pohybovat od stovek wattů až po desítky kilowattů v závislosti na počtu paralelně zapojených nízko výkonných laserů. Vláknové lasery mají nízkou spotřebu elektrické energie, poměrně vysokou účinnost, malou hmotnost, velkou kvalitu laserového svazku a vysokou

spolehlivost (neobsahují žádné složité pohyblivé součásti a čerpadla jako CO₂ laser, ani nepotřebují vodní chlazení jako Nd – YAG laser). V důsledku vysokých výkonů a velké spolehlivosti mohou vláknové lasery v budoucnu nahradit i vysoko výkonné plynové CO₂ lasery [4].

4.6 Požadavky na laserový systém

Na laserový systém je kladeno několik požadavků, z nichž se odvíjí volba konkrétního typu laseru:

- **Výkon laserového záření** – z hlediska technologických aplikací je rozhodující optický výkon laseru. Jeho hodnota by měla být v rozsahu 1 až 30 kW středního výkonu v kontinuálním režimu [10].
- **Vlnová délka záření** – vlnová délka laserového záření je v přímém vztahu s přesností laserového obrábění. Čím je vlnová délka kratší, tím větší přesnosti lze dosáhnout, proto je snaha používat lasery s co nejkratší vlnovou délkou generovaného záření [10].
- **Rozbíhavost laserového paprsku** – ovlivňuje, jak lze laserový paprsek fokusovat laserovým systémem, respektive do jak malého bodu lze světlo soustředit. Jednomódové laserové záření lze fokusovat do bodu srovnatelného s vlnovou délkou [10].
- **Možnost přenosu záření optickým vláknem** – velkou výhodou laserového systému je možnost dopravit záření na místo aplikace prostřednictvím optického vlákna [10].
- **Mobilita** – rozměry, hmotnost laseru a jeho energetická náročnost by měly umožnit přesun laseru na místo určení [10].
- **Provozní náklady** – pořizovací náklady, provozní náklady (spotřeba energie, spotřeba provozních kapalin), údržba (servis a výměna opotřebovaných dílů) a inovace [10].
- **Účinnost laserového systému** – primární zdroj energie u laseru bývá většinou elektrický proud a tak je snaha používat lasery, které mají vysoký poměr elektrického napájecího výkonu k užitečnému výkonu laserového zařízení. Předpokládá se minimum 20 % [10].
- **Robustnost, spolehlivost a stabilita systému** – pro využití v průmyslu je, kromě nízkých provozních nákladů a nízké pořizovací ceny také podmínkou spolehlivost

a odolnost vůči vnějším vlivům, jako jsou otřesy, prach, vlhkost, změny teploty, atd. [10].

- **Ekologické a bezpečnostní faktory** – moderní průmyslové zařízení musí splňovat několik ekologických a bezpečnostních kritérií. Lasery přispívají ke zlepšení ekologických podmínek provozu. Z bezpečnostního hlediska mohou být lasery nebezpečné lidskému zdraví, mohou poškodit zrak [10].

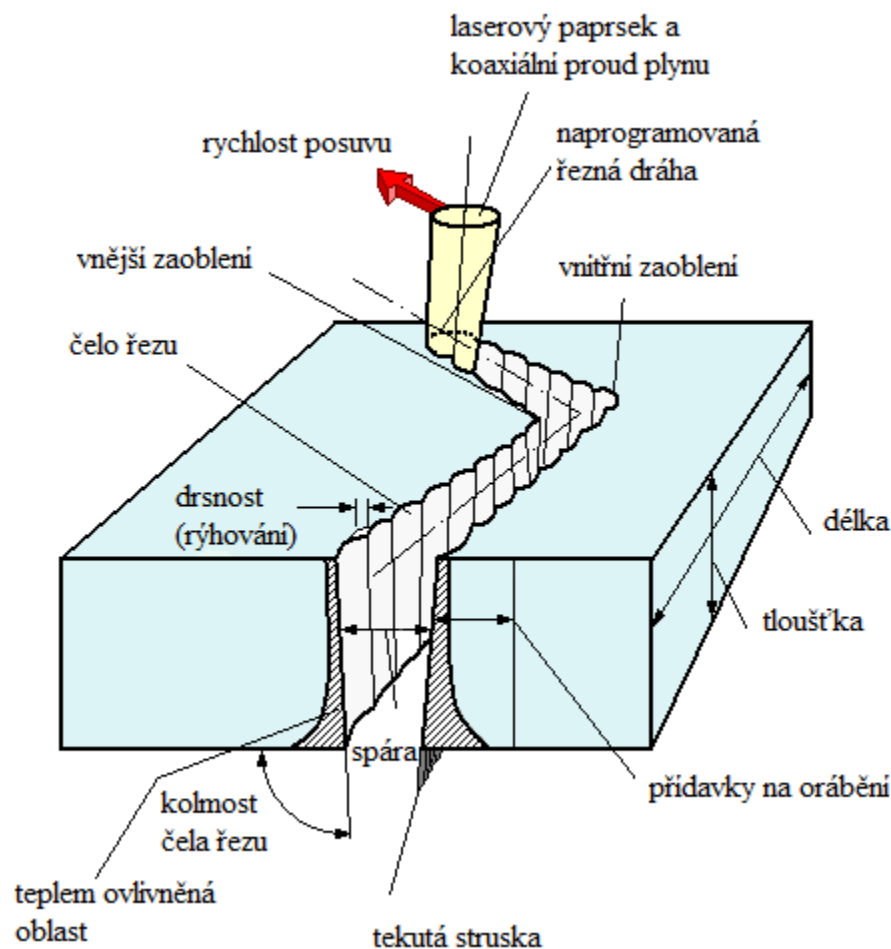
5. Kritéria hodnocení kvality povrchu řezaného laserem

Kvalitu povrchu řezaného laserem, podobně jako kvalitu povrchu řezaného nástrojem s definovanou geometrií bříty, ovlivňuje široké spektrum vlivů [5]. Tyto vlivy můžeme rozdělit do tří skupin podle parametrů na:

1. **Parametry procesu** – tyto parametry procesu při řezání laserovým paprskem zahrnují výkon paprsku, rychlost posuvu paprsku (řeznou rychlost), šířku vytvořené spáry (zářezu), typ paprsku a jeho mód, ohniskovou vzdálenost, průměr fokusovaného paprsku, úhel vychýlení paprsku α (úhel vychýlení je důsledkem průchodu paprsku materiálem, paprsek se odchyluje od původního směru, $\alpha = 75$ až 80%) a přídavný plyn (druh plynu, tlak plynu) [5].
2. **Parametry materiálu** – tyto parametry zahrnují fyzikálně - chemické vlastnosti materiálu, typ materiálu (kov, sklo, keramika, kompozit), termomechanické vlastnosti (tepelná vodivost, viskozita taveniny, povrchové napětí, absorpce, emise, reflektivita) a geometrii obráběného materiálu [5].
3. **Kvalita řezu** – pro sledování kvality řezu je nutné brát v úvahu parametry řezání laserem, které mohou zároveň sloužit jako kritéria pro hodnocení topografie povrchu při řezání laserem. Patří sem šířka řezné drážky (řezné spáry), zaoblení nebo natavení hrany v důsledku řezání laserem, nepravidelnost hrany, velikost teplem ovlivněné oblasti, kuželovitost řezaného otvoru (rozdíl mezi šířkou vstupu a výstupem paprsku), tvoření trhlin, úbytek materiálu, vychýlení paprsku, změna struktury povrchu materiálu, zbytková napětí [5].

Proces řezání kovových materiálů laserovým paprskem lze popsat následovně. Energie kvant elektromagnetického záření (fotonů) ve fokusovaném laserovém paprsku je absorbována tenkou povrchovou vrstvou kovu. Tato absorbovaná energie se mění v teplo, zvyšuje teplotu kovu na bod tavení nebo na bod vypařování. Fokusovaný laserový paprsek zajišťuje vysokou koncentraci energie a při dopadu na povrch materiálu velmi rychle vytváří otvor (řádově v mikrosekundách). Postupem tohoto otvoru se vytváří úzký řez podél řezné dráhy v kovovém materiálu. Roztavený materiál se z mezery odstraňuje proudem inertního plynu vedeného tryskou koaxiálně s laserovým svazkem. Šířka řezné drážky, kvalita řezných hran (vychýlení paprsku a rýhovaná stopa řezu) a vzhled na spodní straně řezu (struska) jsou podmíněny výběrem laseru, kvalitou paprsku, výkonem a typem

řízení pohybu (paprsek, obrobek, nebo jejich kombinace). Znázornění kritérií posuzující kvalitu řezu zobrazuje obrázek 5 [4].



Obrázek 5: Hodnotící kritéria kvality řezu [3]

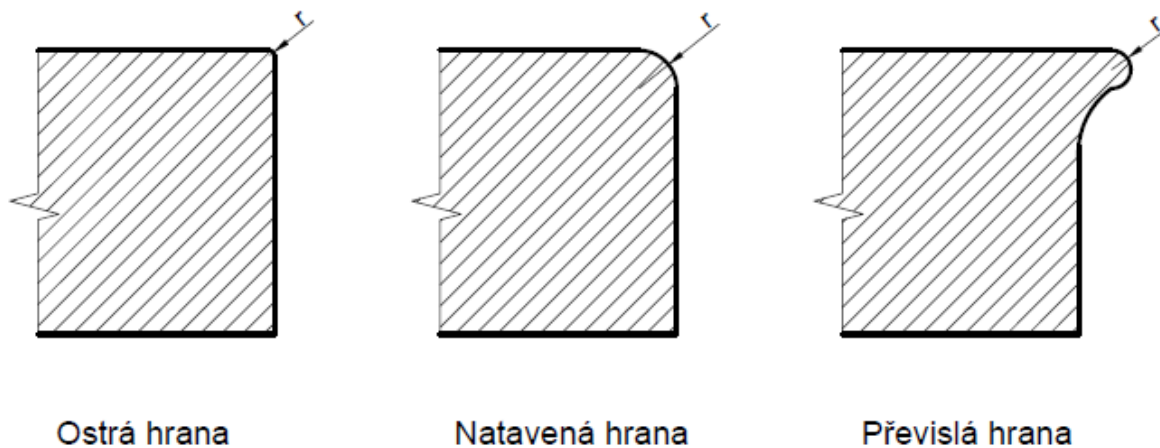
Mezi nejdůležitější ukazatele charakterizující kvalitu řezné stěny při laserovém řezání patří šířka řezné drážky, natavení horní hrany, tekutá struska na spodní straně řezu, odchylka kolmosti řezné stěny, drsnost povrchu řezané stěny a teplem ovlivněná oblast [4].

5.1 Šířka řezné drážky

Řezná drážka je definována jako řez na nejširším místě vznikající při procesu řezání laserovým paprskem. Šířka řezné drážky představuje vzdálenost dvou řezných ploch v řezné mezeře a představuje množství (objem) materiálu odstraněného při řezání. Závisí na velikosti bodu zaostření paprsku, na výkonu laseru a řezné rychlosti. Je ovlivňována tlakem kyslíku při řezání měkkých ocelí. Dynamický charakter exotermické oxidační reakce vytváří nepravidelnou šířku řezné drážky a hluboké rýhování na stěně řezu [4].

5.2 Natavení horní hrany

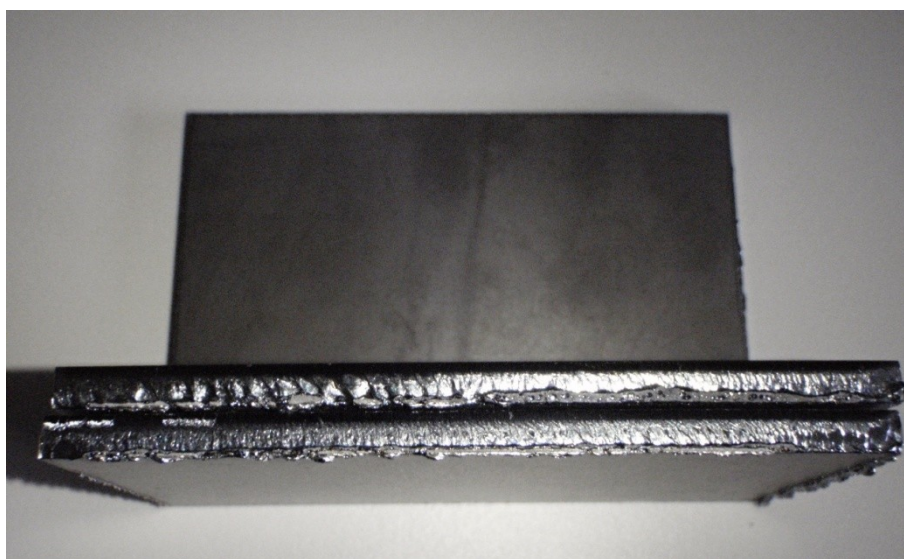
Je to veličina charakterizující tvar horní hrany. Je popisována poloměrem zaoblení horní hrany. Může být ostrá, natavená nebo převislá (obrázek 6) [4].



Obrázek 6: Natavení horní hrany

5.3 Tekutá struska na spodní straně řezu

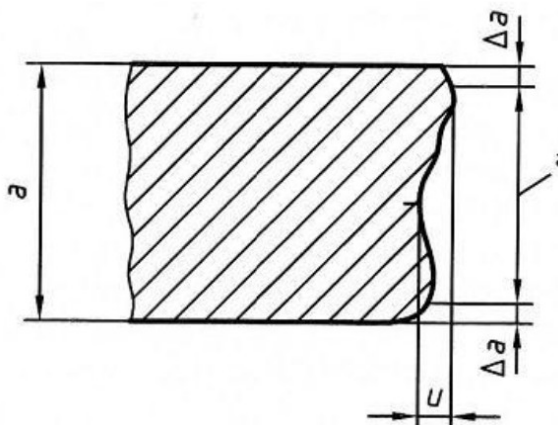
Tekutá struska je část roztaveného materiálu, který není zcela odstraněn z řezné drážky a je zachycen na spodní straně řezu. Formování této přilnavé strusky je spojeno s vlastnostmi toku taveniny a geometrickým tvarem roztaveného materiálu na spodní straně řezu. Roztavené kovy s vysokými hodnotami povrchového napětí a viskozity je obtížné odstranit z řezné drážky proudem přídavného plynu. Důsledkem toho je přilnavá tekutá struska (obrázek 7) na spodní straně řezu [4].



Obrázek 7: Tekutá struska na spodní straně řezu

5.4 Odchylka kolmosti řezné stěny

Odchylka kolmosti u je největší kolmá vzdálenost mezi skutečným a určeným povrchem (obrázek 8). Tolerance kolmosti jsou dány normou pro tepelné řezy (BS EN ISO 9013:2002) [4].



Obrázek 8: Odchylka kolmosti u pro kolmý řez, kde a je tloušťka materiálu a Δa je redukovaná tloušťka pro určení tolerance kolmosti [4]

5.5 Drsnost povrchu řezné stěny

Moderní konstrukce jsou z velké části namáhány dynamicky. Kvůli tomu je řada konstrukcí limitována vlastnostmi materiálu, jeho strukturou apod. Drsnost povrchu je charakterizována nerovnostmi nebo nepravidelnostmi povrchu. Vztah mezi funkcí povrchu a jakostí povrchu je možné hodnotit ze dvou hledisek. První je prostorové uspořádání (textura, morfologie) povrchu. Prostorové uspořádání je vyjadřováno především drsností povrchu. Druhým hlediskem jsou fyzikální a chemické vlastnosti povrchové vrstvy. Proces řezání laserem ovlivňuje tvar řezné fronty a mechanismus toku taveniny. Výsledkem je tvorba rýhování na stěně řezu (obrázek 9).



Obrázek 9: Reliéfy ploch po řezání laserem s různými parametry

Největší výška nerovnosti profilu R_z měřená v mikrometrech je používána při klasifikaci kvality řezu. Rozsahy pro její klasifikaci poskytuje norma pro tepelné řezy. Nejmenší hodnota R_z poskytuje nejlepší kvalitu z hlediska drsnosti řezných stěn. Pro speciální aplikace např. v leteckém průmyslu je drsnost povrchu měřená pomocí metalografické mikroskopie charakteru a šířky teplem ovlivněné oblasti přetavené vrstvy. Vyhodnocení kvality řezné stěny lze provádět vizuálně. Vyhodnocení drsnosti hrany pak závisí na operátorovi a jeho schopnostech. Důsledkem toho je neopakovatelnost a nereprodukovatelnost měření a vyhodnocení. Snížení subjektivity vyžaduje pečlivé sledování kvality. K vyhodnocení drsnosti povrchu se pak používají mechanické profilometry a další nekontaktní metody zkoumání povrchu [1], [4].

5.6 Teplem ovlivněná oblast

Materiál je v místě řezu roztavený laserovým paprskem, který je bodovým zdrojem tepla. Tepelně ovlivněná oblast je ta část, jejíž mikrostruktura je ovlivněna teplem, takže leží mimo zóny roztavení. Při analýze vlivu tepla na řez je třeba znát rychlost ohřevu, maximální dosaženou teplotu, čas setrvání na maximální teplotě, rychlost ochlazování [4].

Rychlost ohřevu závisí na velikosti a intenzitě zdroje tepla a na materiálových vlastnostech, tj. zejména na účinnosti prostupu tepla do základního materiálu, dále na hustotě základního materiálu a na koeficientu tepelné vodivosti [4].

Maximální dosažená teplota je parametr, který rozděluje oblast svaru resp. řezu na charakteristické oblasti. Patří sem oblast, která je vyhřátá nad teplotu solidu; oblast

přechodového pásma nebo hranici natavení; oblast tepelně ovlivněná s teplotami nad A_{c3} a tepelně ovlivněná oblast s teplotami v intervalu A_{c1} až A_{c3} . U teplem ovlivněné oblasti s teplotou nad A_{c3} dochází k úplné rekrytalizaci a v oblasti s teplotami v intervalu A_{c1} až A_{c3} dochází k částečné rekrytalizaci [4].

Rychlost ochlazování souvisí, podobně jako rychlost ohřevu, s přenosem tepla. Teplo z místa řezu (svaru) se do okolí přenáší konvekcí a radiací a ve svařovaných materiálech kondukcí tepla. Rychlost ochlazování vyjadřujeme parametrem času chladnutí např. Δt 8/5 mezi teplotami 800 a 500 °C nebo Δt 3/1 mezi teplotami 300 a 100 °C. Čím je rychlost ochlazování v oblasti transformačních teplot vyšší, tím je větší pravděpodobnost získání nerovnoměrných struktur (austenit, martenzit). Mikrostrukturní změny teplem ovlivněné oblasti závisí na chemickém složení oceli, ale často i na její původní mikrostruktuře, která vznikla po tepelném zpracování [4].

6. Hodnocení topografie povrchu

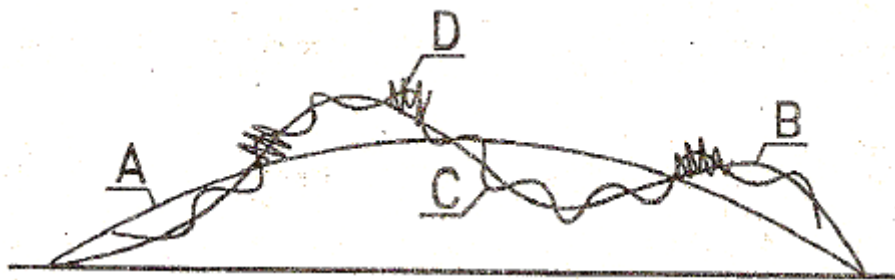
Kvalita povrchu strojních součástí je jednou ze základních podmínek správné funkce strojů a významně ovlivňuje životnost součástí. Neustálé zvyšování nároků na výkon, účinnost, přesnost, spolehlivost, trvanlivost strojů vyžaduje, aby jakost povrchu byla předepisována na výkresech, podobně jako přesnost rozměrů. Z parametrů, které charakterizují jakost povrchu, je drsnost povrchu nejdůležitějším parametrem. Distribuce drsnosti a dalších hlavních složek topografie povrchu řezných stěn je velmi důležitá z analytického hlediska. Od roku 1930, kdy byly vyvinuty přístroje pro měření topografie povrchu, byl zaznamenán velký pokrok jak v metodách, tak i v zařízeních pro měření. Velkým pokrokem bylo uplatnění digitálních metod v 60. letech, které mohou hodnotit povrch metodou 3D [4].

6.1 Metrologie kvality povrchu a jeho parametry

Kvalitu povrchu určuje nejen mikrogeometrický tvar a velikost nerovností, které nazýváme souhrnně drsnost povrchu, ale i fyzikální a chemický stav povrchové vrstvy materiálu. Tento stav závisí na způsobu zpracování materiálu od výroby polotovaru až po dokončovací způsoby obrábění. Může být výsledkem různých úprav povrchu, kterými se má dosáhnout některých požadovaných vlastností (např. tvrdosti, odolnosti proti korozi, lesku, barvy apod.) Podle druhu povrchu rozeznáváme neobrobený a obrobený povrch. Obrobený povrch se vždy liší od ideálního geometrického tvaru. Nulová drsnost, tj. ideální „hladkost“, je na technickém povrchu prakticky nedosažitelná. Všechny technické povrchy mají nějakou drsnost. Drsnost je univerzální charakteristikou všech povrchů a může mít nejrůznější formy [1], [4]. Nerovnosti obrobených ploch znázorňuje obrázek 10. Drsnost povrchu zahrnuje široké spektrum odchylek od geometrického tvaru povrchu, které je možné klasifikovat pomocí popisných charakteristik:

- A) Mimořádné nerovnosti (makronerovnosti) - trhliny, náhodné nerovnosti, nepravidelné rýhy.
- B) Vlnitost povrchu - periodicky opakující se nerovnost. Její tvar je podobný sinusoidě, má poměrně pravidelný rozestup a amplitudu. Vlnitost povrchu vzniká chvěním nástroje a obráběné součásti.
- C) Drsnost povrchu (mikronerovnost) - pravidelně se opakující nerovnost. Je podmíněna technologickým pochodem.

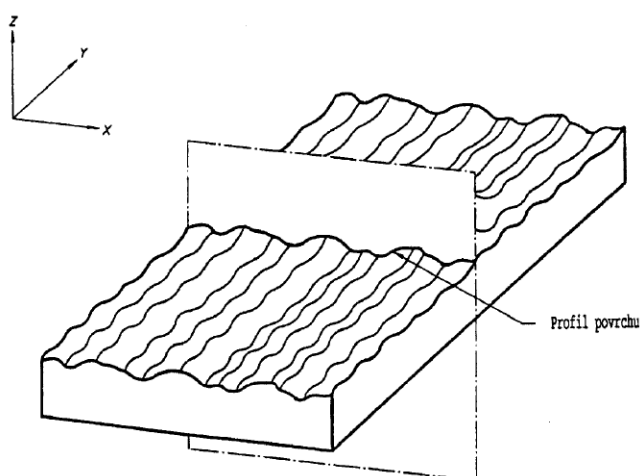
- D) Ultramikronerovnosti** – superponují se na opakující se nerovnosti a jsou dány snahou krystalického povrchu dosáhnout nejstabilnějšího stavu.



Obrázek 10: Geometrický model povrchu [1]

Obor textury povrchu byl v ISO revidovaný v srpnu 1998 a údaje jsou zpracovány v normě GPS (specifikace geometrického produktu). Filozofie této normy určuje význam vztahu tolerance k funkčnosti povrchu, což se projevuje používáním různých parametrů textury povrchu. Norma ČSN EN ISO 4287 stanovuje termíny, definice a parametry pro určování struktury povrchu (drsnosti a vlnitosti základního profilu) profilovou metodou. Profilová metoda hodnotí povrch z profilu povrchu, tj. z „čáry“, která vznikne řezem skutečného povrchu definovanou plochou. Tato norma přináší definice různých profilů povrchu, které jsou potřebné při zpracování a vyhodnocení snímaného profilu [1],[2]. Nejdůležitější profily jsou:

- **Skutečný profil** – povrch omezující těleso a oddělující ho od okolního prostředí [2].
- **Profil povrchu** – vznikne jako průsečnice skutečného profilu a dané roviny (obrázek 11) [2].



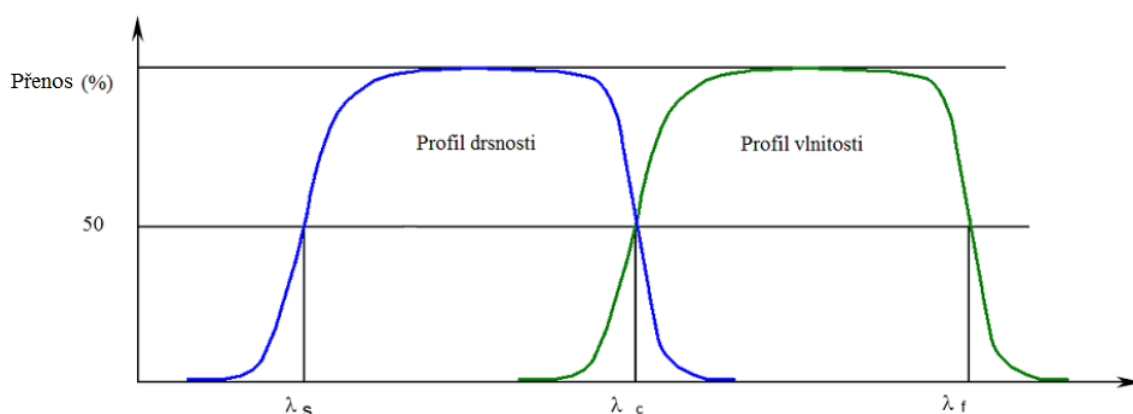
Obrázek 11: Profil povrchu [2]

- **Snímaný profil** – odvozují se z něj všechny ostatní profily definované v uvedené normě. Je definován jako geometrické místo středu hrotu dotyku, který má ideální

geometrický tvar (kužel s kulovým zakončením), jmenovité rozměry a při pohybu po povrchu v rovině řezu na něj působí jmenovitá snímací síla [2],[4].

- **Úplný profil** – je to digitální forma snímaného profilu vzhledem k referenčnímu profilu, ve formě vertikálních a horizontálních navzájem si odpovídajících souřadnic. Je charakterizován vertikálním a horizontálním číslicovým krokem [2],[4].
- **Základní profil** – odvozuje se z úplného profilu po aplikaci filtru s krátkou vlnovou délkou, označovanou λ_s . Reprezentuje základ pro digitální zpracování profilu filtrem profilu a výpočtu parametrů profilu podle ČSN EN ISO 4287. Je charakterizován vertikálním a horizontálním číslicovým krokem, který může být různý od vertikálního a horizontálního číslicového kroku použitého při vytváření úplného profilu. Jmenovitý tvar profilu na výkresu součástky, který získáme metodou nejmenších čtverců, není součástí primárního profilu a musí se vyloučit před tím, než se použije filtr. Pro kružnici musí být do optimalizace metodou nejmenších čtverců zahrnut i poloměr, tj. nemá se používat jeho jmenovitá hodnota [4].
- **Profil drsnosti** – odvozuje se ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru profilu λ_c . Přenosové pásmo profilu drsnosti je definováno filtry profilu λ_s a λ_c . Tento profil je základem určení parametrů profilu drsnosti [2].
- **Profil vlnitosti** – odvozuje se ze základního profilu použitím profilových filtrů λ_f a λ_c . Postupně se na základní profil aplikuje filtr profilu λ_f a λ_c . Profilový filtr λ_f filtruje dlouhovlnné složky a λ_c filtruje krátkovlnné složky [2].

Přenosové charakteristiky pro profil drsnosti a vlnitosti znázorňuje obrázek 12.



Obrázek 12: Přenosové charakteristiky pro profil drsnosti a vlnitosti [2]

Z profilu povrchu (obrázek 11) se odvozují jednotlivé profily, u kterých jsou definovány parametry:

- **Základní parametr (P – parametr)** – parametr vypočítaný ze základního profilu [2].
- **Parametr drsnosti (R – parametr)** – parametr vypočítaný z profilu drsnosti [2].
- **Parametr vlnitosti (W – parametr)** – parametr vypočítaný z profilu vlnitosti [2].

Mezi nejvýznamnější definice výškových parametrů profilu povrchu patří:

- **Ra** – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu. Je to aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $y(x)$ v rozsahu základní délky l [2]. *Ra* lze vyhodnotit podle (5.1)

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (5.1)$$

kde l je základní délka profilu [mm], $y(x_i)$ jsou výšky nad nebo pod střední čarou profilu [mm].

- **Rq** – průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu. Je to kvadratický průměr pořadnic $y(x)$ v rozsahu základní délky l [2]. *Rq* je možné vyhodnotit podle (5.2)

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx} \quad (5.2)$$

kde l je základní délka profilu [mm], $y(x_i)$ jsou výšky nad nebo pod střední čarou profilu [mm].

- **Rz** – největší výška profilu. Je to součet výšky Zp a hloubky Zv . Zp je nejvyšší výstupek profilu a Zv je nejnižší prohlubeň profilu v rozsahu základní délky l [2].

6.2 Metody hodnocení a měření topografie povrchu

Metody hodnocení a měření topografie povrchu lze rozdělit na kvantitativní a kvalitativní. Kvantitativní metody hodnocení nám poskytnou číselnou hodnotu některé veličiny topografie povrchu např. *Ra*, *Rq*, *Rz*. Tyto hodnoty se měří speciálními přístroji, např. dotykovým profilometrem nebo optickými měřicími přístroji. Kvalitativní metody hodnotí veličiny topografie povrchu porovnáváním se vzorky, u kterých jsou tyto veličiny

známé. Porovnávací vzorky mají tvar destiček nebo válečků a jejich drsnosti jsou stanoveny některou z kvantitativních metod [1].

6.2.1. Mechanické metody měření

Největší uplatnění při hodnocení drsnosti povrchu ve strojírenském průmyslu mají dotykové profilometry. Jde o širokou škálu přístrojů, které pracují na mechanickém principu. Mechanický signál je převeden na signál elektrický. Důsledkem přímého kontaktu hrotu profilometru a měřeného povrchu dochází, zejména u měkkých kovů, k deformaci povrchové vrstvy. Velikost deformace povrchu závisí na tvrdosti povrchu. V některých případech dojde k poškození měřeného povrchu hrotem profilometru. To znehodnocuje měřený povrch a výsledky měření a je prakticky nemožné provést kontrolní měření nebo měření zopakovat. Výhodou kontaktních profilometrů je jejich vysoká rozlišovací schopnost a velký rozsah rozlišení ve směru kolmém na plochu. Nevýhodou je poškození povrchu u měkkých materiálů, relativně pomalý pohyb hrotu po měřeném povrchu, nadměrná selekce získaných informací a nemožnost průběžné kontroly drsnosti povrchu [1], [4].

6.2.2. Optické metody měření

Optické metody měření mohou být jistou náhradou za měření kontaktními profilometry. Jde o bezdotykové měření. Povrch zůstává neporušený. Dotykový hrot je nahrazen světelným paprskem, který se od měřeného povrchu odráží nebo rozptyluje. Vzájemné působení světla a povrchu je závislé na vlnové délce, drsnosti povrchu a vlastnostech měřeného povrchu. Jestliže jde o nepřímé měření, je potřeba experimentální data porovnat s daty získanými mechanickými metodami. Výhody optických metod měření jsou bezkontaktnost, takže nepoškozuje měřený povrch, vysoká informativnost, opakovatelnost měření, okamžité výsledky. Nevýhodou je složitější výklad výsledků, měření parametrů drsnosti je fyzikálně nepřímé, převedení na normované parametry náročnější [1], [4].

6.2.3. Ostatní metody měření

Tyto metody pracují na jiném principu než metody měření mechanické či optické. Patří sem například mikroskopy SEM, STM, AFM, pomocí kterých můžeme zjistit topografii povrchu, lokální magnetismus, odrazivost a absorpci světla, elektrickou

vodivost, tepelnou vodivost atd. Tyto přístroje umožňují snímat povrch v atomárním měřítku [4].

6.3 Metody měření pro řešení experimentální části

Na měření drsnosti povrchu byl použit měřicí přístroj Surftest SJ – 400.

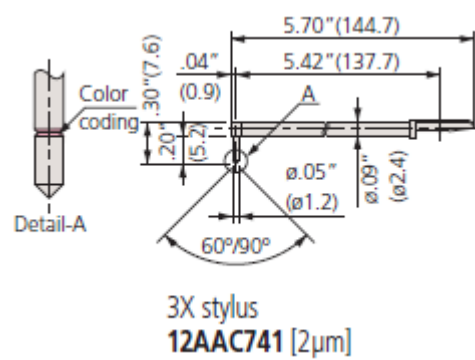
6.3.1. Surftest SJ – 400

Jde o dotykový přístroj (obrázek 13), který má diamantový měřicí hrot, pro měření topografie povrchu. Hodnotí parametry povrchu, např. největší výšku výstupku profilu R_p , největší hloubku prohlubně profilu R_v , největší výšku profilu R_z , průměrnou výšku profilu R_c , celkovou výšku profilu R_t , průměrnou aritmetickou úchylku R_a , průměrnou kvadratickou úchylku R_q , šikmost R_{sk} , špičatost R_{ku} , průměrnou šířku R_{Sm} , průměrný kvadratický sklon R_{dq} a další parametry podle různých národních a mezinárodních norem. Všechny tyto parametry se většinou měří v μm . Naměřené hodnoty se zobrazují digitálně nebo graficky na displeji s možností výstupu na počítač.



Obrázek 13: Surftest SJ – 400 [8]

Dotykový hrot je diamantový. Konkrétní hodnoty parametrů povrchu lze stanovit na základě posuvného pohybu, který koná hrot po měřeném povrchu. V experimentální části práce byl pro měření parametrů povrchu použit hrot pro hluboké otvory, který znázorňuje obrázek 14.



Obrázek 14: Dotykový hrot pro hluboké otvory [8]

7. Návrh experimentů

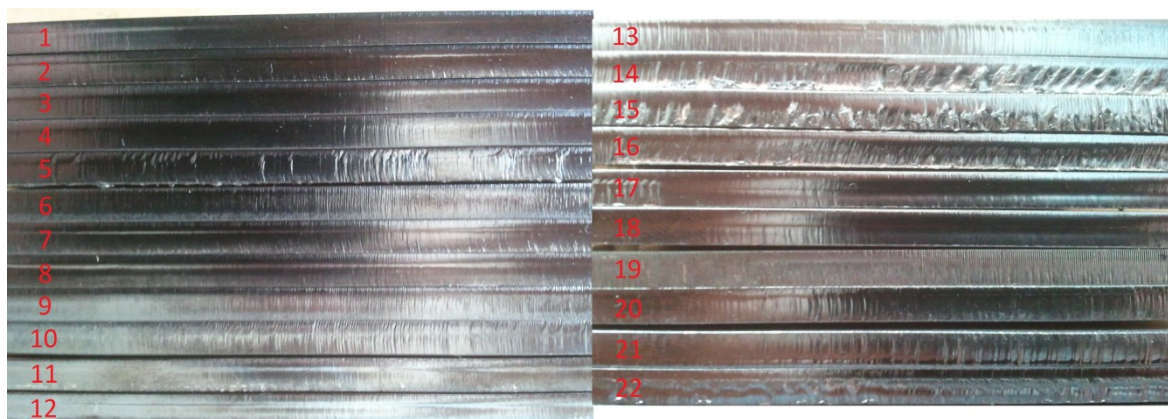
Experimentální část bakalářské práce obsahuje popis výroby vzorků technologií laserového řezání a hodnocení topografie povrchu (drsnoti). Na uskutečnění experimentu bylo použito laserové řezací zařízení od firmy Trumpf, a to TruLaser 3030 s laserem TruFlow do výkonu 4000 wattů. Jde o plynový CO₂ laser s vlnovou délkou 10,6 μm. Konstantní výkon vztahený na výkon laseru je $\pm 2 \%$. Výkon je 4000 wattů. Tento laser je schopen řezat konstrukční ocel o tloušťce 20 mm, ušlechtilou ocel o tloušťce 15 mm a hliník o tloušťce 10 mm. Na měření vzorků a následné vyhodnocení topografie povrchu byl použit kontaktní profilometr SurfTest SJ – 400.

7.1 Experimentální řezání

První část experimentů se týká řezání vzorků laserovým paprskem. Jak je uvedeno výše, bylo použito laserové zařízení od firmy Trumpf TruLaser 3030 (obrázek 15) s laserem TruFlow 4000. Bylo vyrobeno 22 vzorků (obrázek 16), které jsou z oceli. Podle ČSN 42 0002 jde o ocel 11375. Velikost vzorků byla 100 mm x 60 mm a tloušťka řezaného materiálu 5 mm (obrázek 16). Byla použita 7,5" čočka. Asistenční plyn byl O₂ a jeho tlak byl 0,8 baru. Průměr a vzdálenost trysky byl 1 mm. Rychlost řezání, výkon laseru, ohnisková vzdálenost a řezná spára se měnily pro jednotlivé vzorky (tabulka 3).



Obrázek 15: Trumpf TruLaser 3030 [11]



Obrázek 16: Experimentální vzorky

Tabulka 3: Technologické podmínky řezání

Číslo vzorku	Rychlost řezání [mm/min]	Výkon [W]	Ohnisková vzdálenost [mm]	Řezná spára [mm]
1	3400	3600	-1,2	0,25
2	4000	3600	-1,2	0,25
3	4000	4000	-1,2	0,25
4	4000	4000	-0,4	0,25
5	4000	4000	-2	0,25
6	4000	4000	-1,2	0,2
7	4000	3200	-1,2	0,25
8	4000	3200	-0,4	0,25
9	2500	3600	-1,2	0,25
10	2500	4000	-1,2	0,3
11	2500	4000	-1,2	0,2
12	2500	4000	-2	0,2
13	2500	4000	-1,2	0,25
14	2500	4000	-2	0,25
15	2500	3200	-1,2	0,25
16	2500	3200	-0,4	0,25
17	3400	3600	-0,4	0,2
18	3400	3600	-1,2	0,2
19	3400	3600	-1,2	0,3
20	3400	4000	-2	0,25
21	3400	4000	-1,2	0,3
22	3400	4000	-0,4	0,3

Charakteristika oceli ČSN 11375 (S235JRH)

Jde o neušlechtilou konstrukční nízkouhlíkovou ocel obvyklé jakosti, dobře svařitelnou, která se používá na výrobu běžných konstrukčních a strojních součástí. Chemické složení je uvedeno v tabulce 4, mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 5 a základní fyzikální vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 4: Chemické složení oceli ČSN 11375

C [%]	P [%]	S [%]	N [%]
max. 0,17	max. 0,045	max. 0,045	max. 0,009

Tabulka 5: Mechanické vlastnosti oceli ČSN 11375

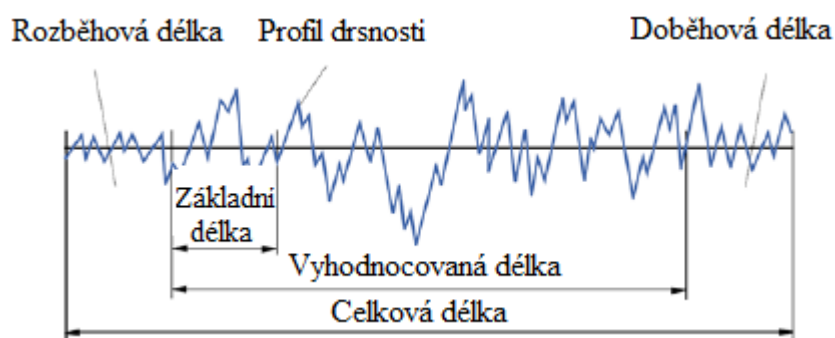
Re [MPa]	Rm [MPa]	Tvrdost [HB]	Tažnost A10 [%]	Kontrakce [%]
196 až 235	363 až 441	161 až 223	23	45 až 50

Tabulka 6: Základní fyzikální vlastnosti oceli ČSN 11375

Hustota ρ [kg·m ⁻³]	teplotní součinitel roztažnosti α [K ⁻¹]	tepelná vodivost λ_l [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
7850	$11,1 \cdot 10^{-6}$	54,5

7.2 Experimentální měření

Na měření drsnosti povrchu vzorků byl použit kontaktní profilometr SurfTest SJ – 400. Vzorky se měřily od horní hrany ke spodní. Začátek měření vzorku byl 0,5 mm od horní hrany a po intervalu 0,4 mm bylo naměřeno 10 hodnot na každém vzorku. Parametry měření a podmínky vyhodnocení znázorňuje obrázek 17 a tabulka 7.

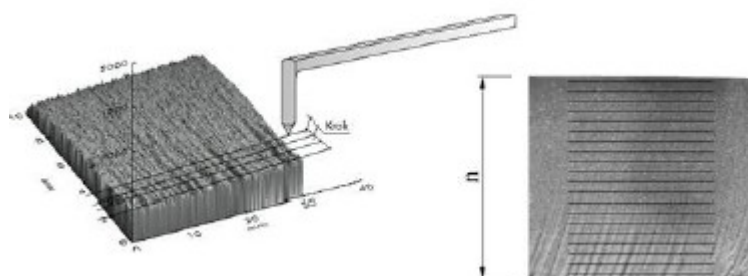


Obrázek 17: Parametry měření SurfTest SJ – 401

Tabulka 7: Podmínky vyhodnocení měření

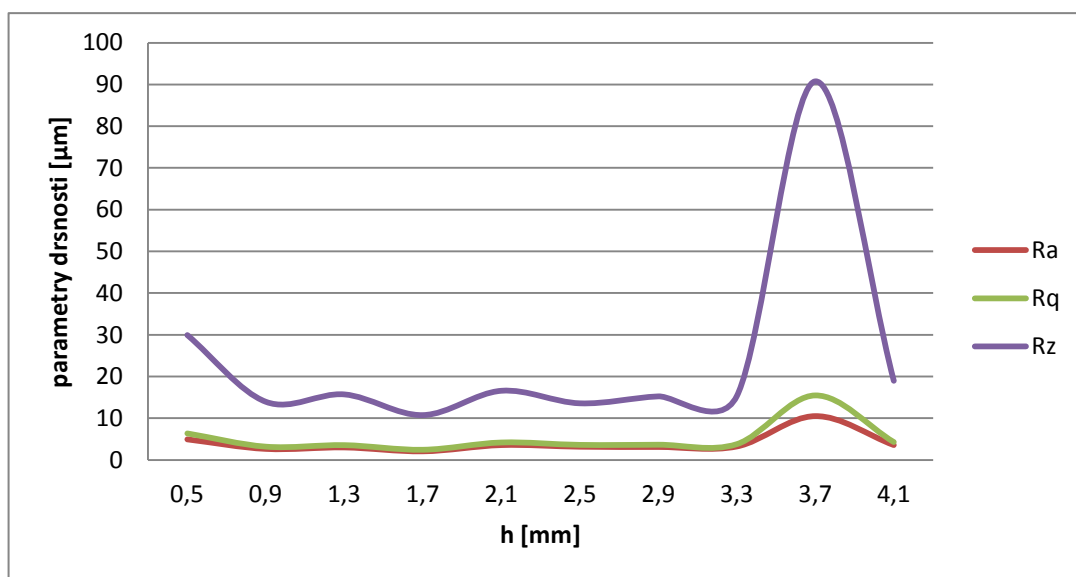
Druh profilu	R ISO
Základní délka [mm]	0,8
Počet základních délek	5
Lc [mm]	0,8
Ls [mm]	0,0025
Druh filtru	Gauss
Vyhodnocovací délka [mm]	4,0
Přejezd [mm]	0,4
Nájezd [mm]	0,4
Délka měření [mm]	4,8
Rychlost měření [mm·s ⁻¹]	1,0

Schéma měření znázorňuje obrázek 18. Princip měření je stejný pro všechny vzorky.



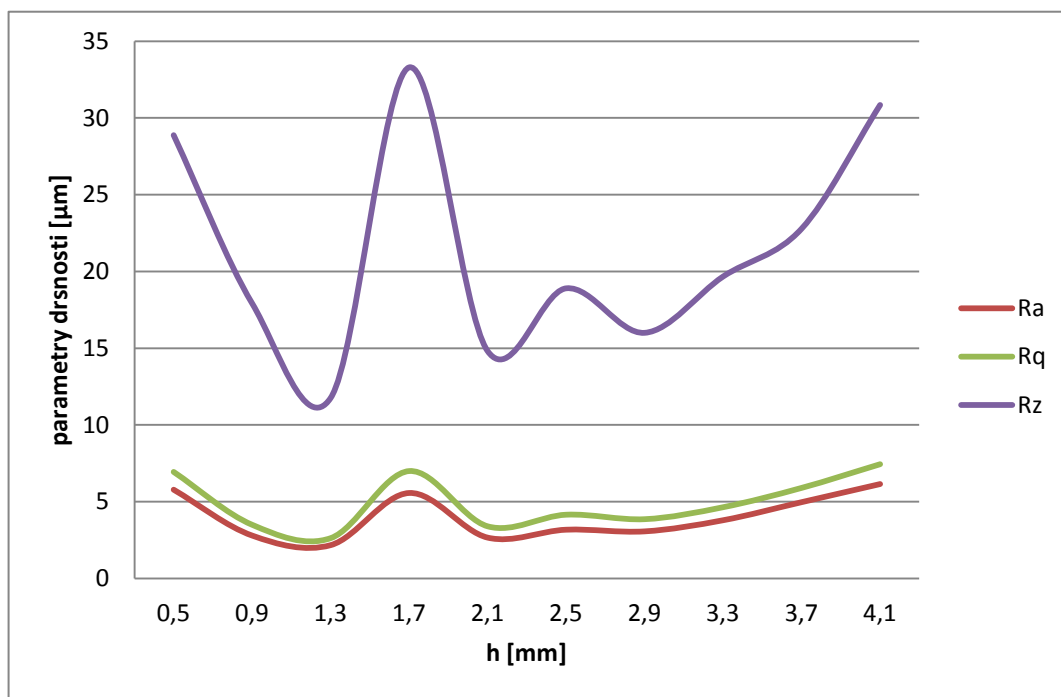
Obrázek 18: Schéma měření kontaktním profilometrem [4]

První měření u vzorku č. 2 kontaktním profilometrem je v příloze č. 1. Naměřené hodnoty parametrů drsnosti R_a , R_z a R_q jsou dány do grafu v závislosti na rostoucí hloubce h . Parametry drsnosti R_a , R_z a R_q pro vzorek č. 1 znázorňuje obrázek 19. Číselné hodnoty jsou v příloze č. 2.



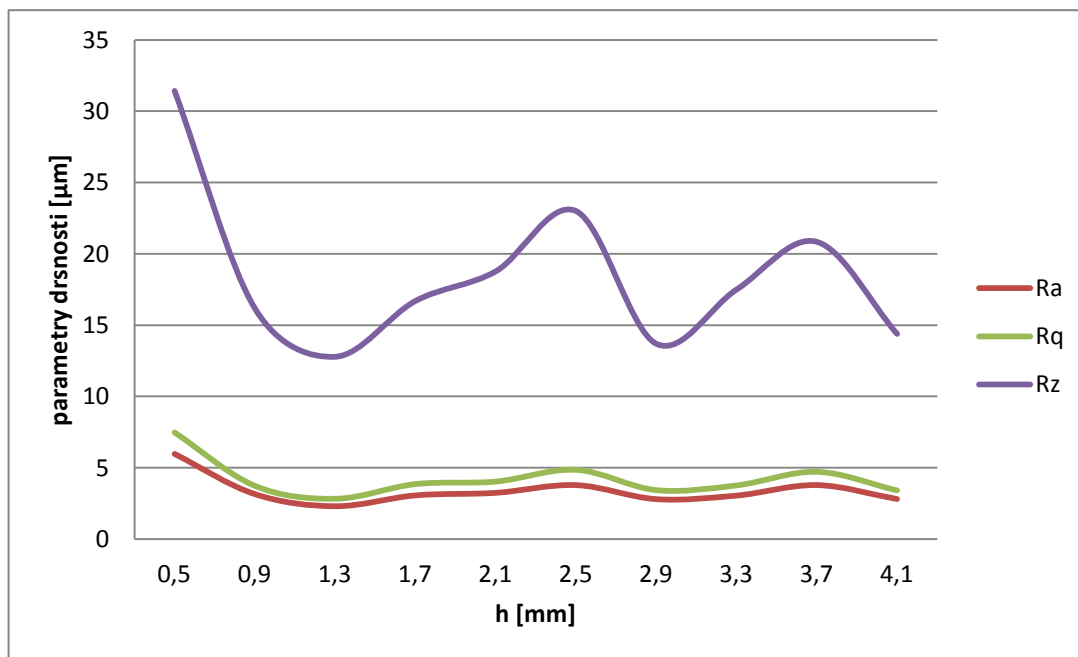
Obrázek 19: Průběh hodnot parametrů R_a , R_z , R_q v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 1

Parametry drsnosti Ra , Rz a Rq pro vzorek č. 2 znázorňuje obrázek 20. Číselné hodnoty jsou v příloze č. 3.



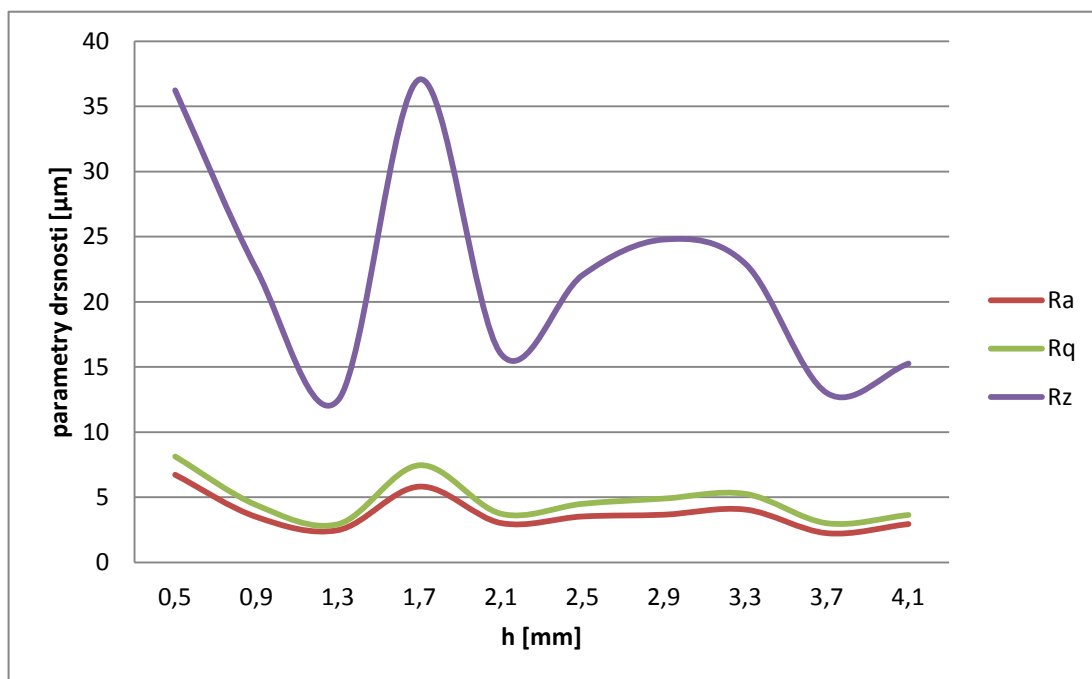
Obrázek 20: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 2

Parametry drsnosti Ra , Rz a Rq pro vzorek č. 3 znázorňuje obrázek 21. Číselné hodnoty jsou v příloze č. 4.



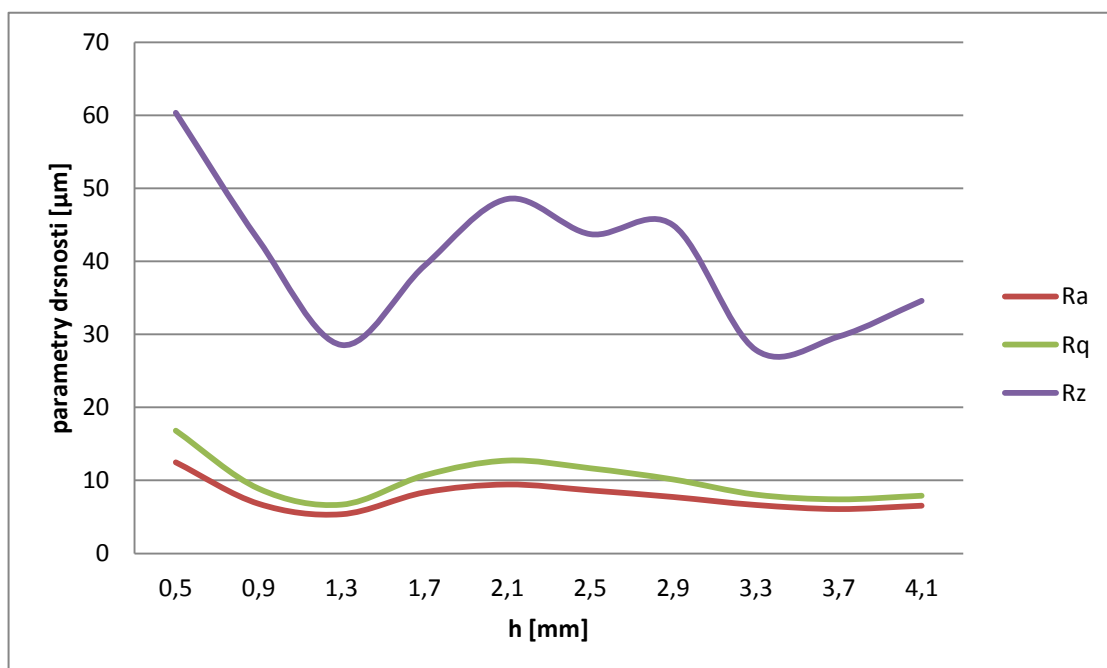
Obrázek 21: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 3

Parametry drsnosti Ra , Rz a Rq pro vzorek č. 4 znázorňuje obrázek 22. Číselné hodnoty jsou v příloze č. 5.



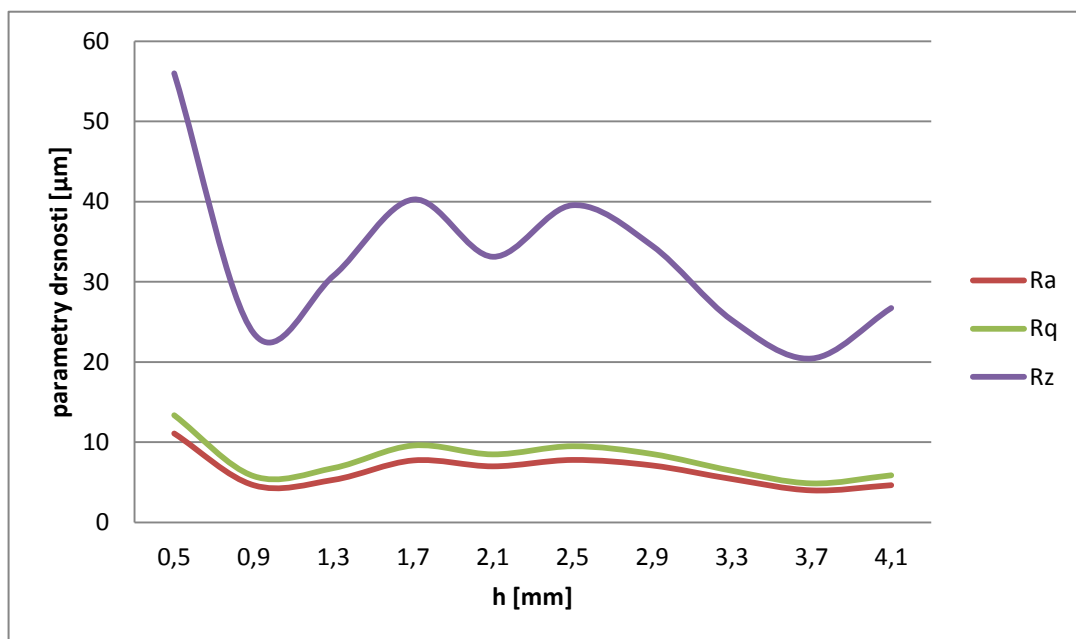
Obrázek 22: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 4

Parametry drsnosti Ra , Rz a Rq pro vzorek č. 5 znázorňuje obrázek 23. Číselné hodnoty jsou v příloze č. 6.



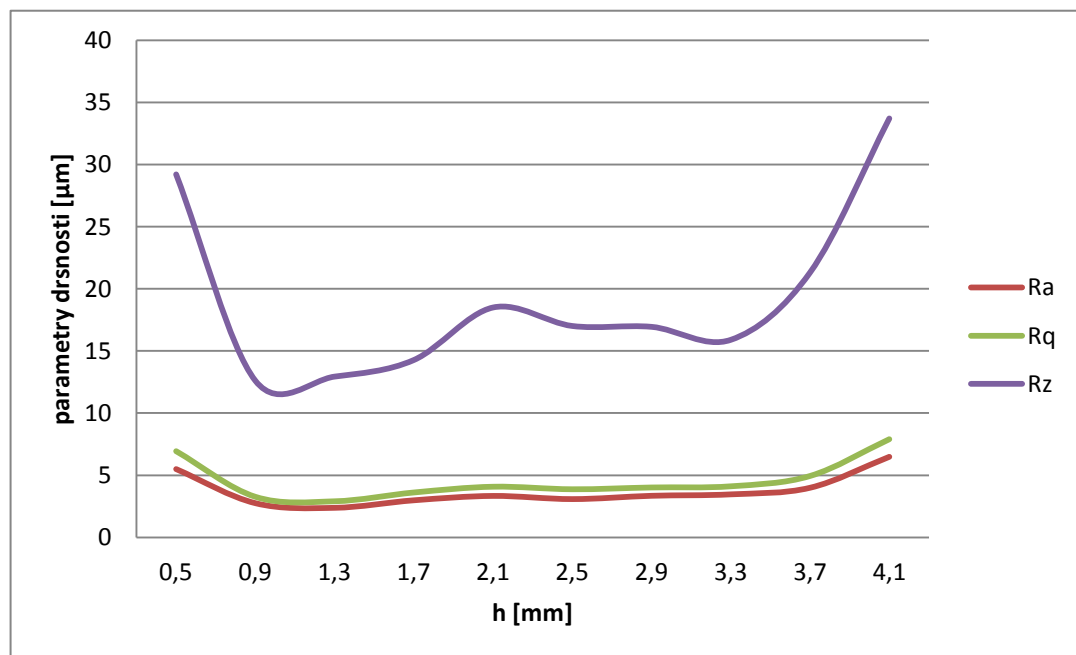
Obrázek 23: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 5

Parametry drsnosti Ra , Rz a Rq pro vzorek č. 6 znázorňuje obrázek 24. Číselné hodnoty jsou v příloze č. 7.



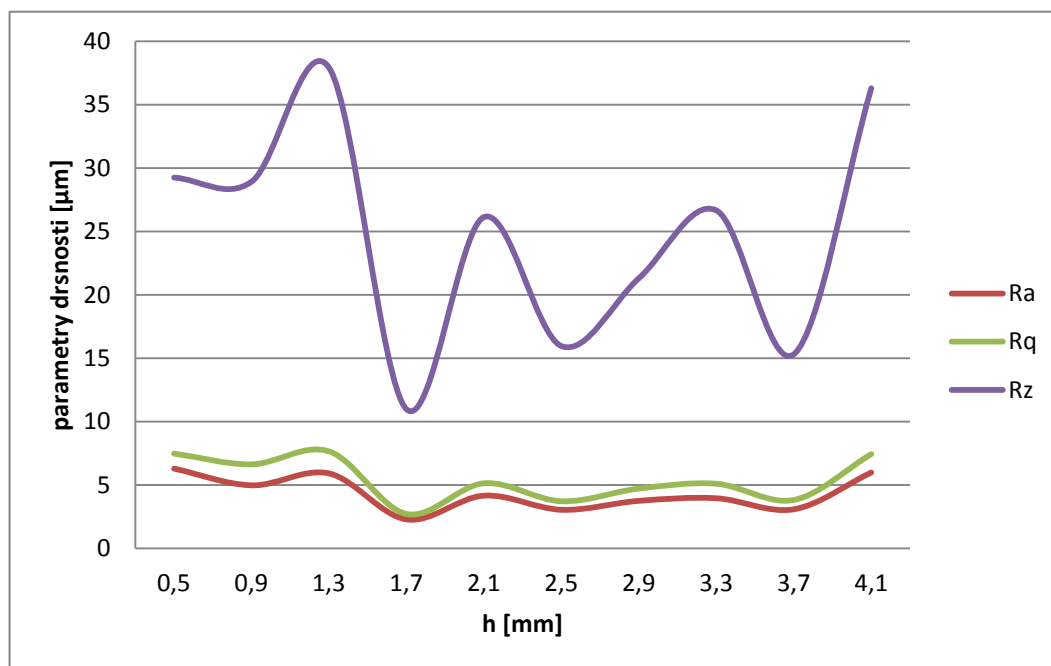
Obrázek 24: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 6

Parametry drsnosti Ra , Rz a Rq pro vzorek č. 7 znázorňuje obrázek 25. Číselné hodnoty jsou v příloze č. 8.



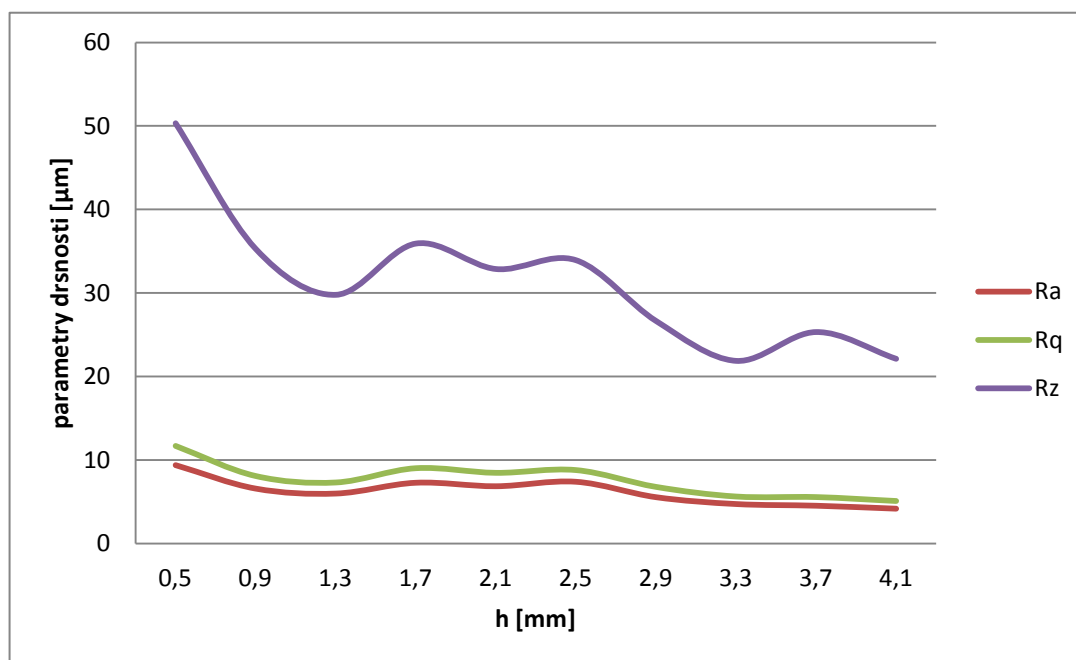
Obrázek 25: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 7

Parametry drsnosti Ra , Rz a Rq pro vzorek č. 8 znázorňuje obrázek 26. Číselné hodnoty jsou v příloze č. 9.



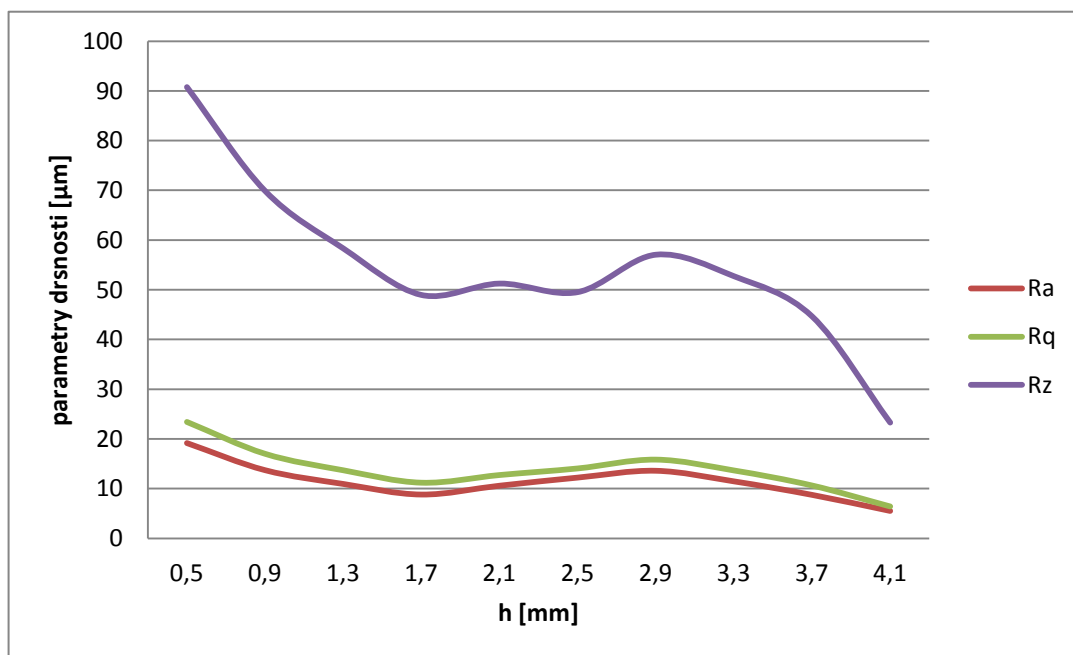
Obrázek 26: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 8

Parametry drsnosti Ra , Rz a Rq pro vzorek č. 9 znázorňuje obrázek 27. Číselné hodnoty jsou v příloze č. 10.



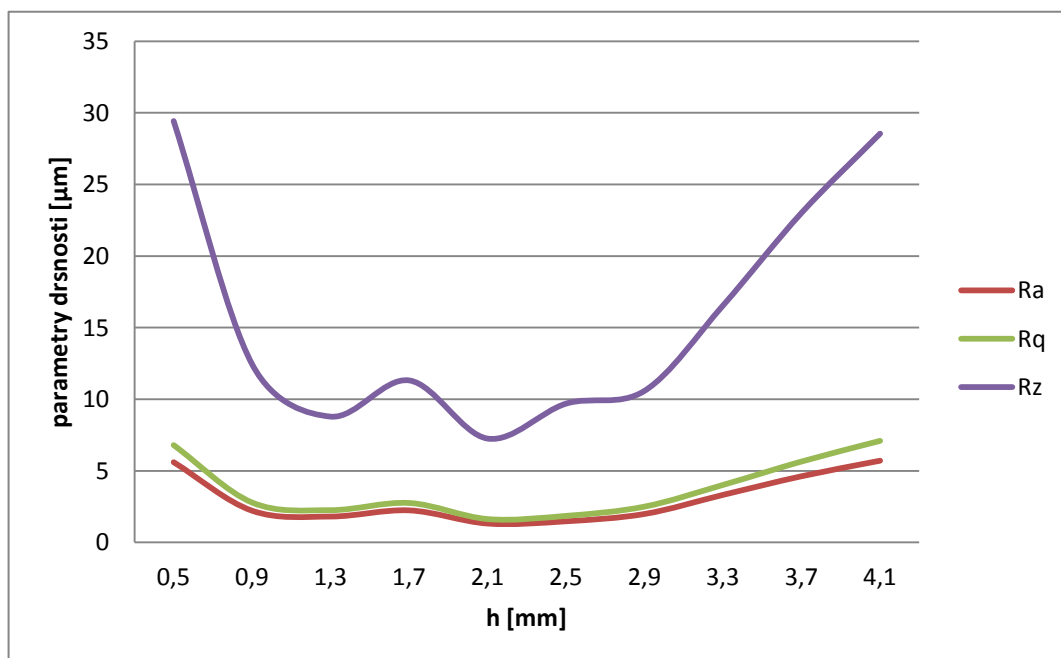
Obrázek 27: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 9

Parametry drsnosti Ra , Rz a Rq pro vzorek č. 10 znázorňuje obrázek 28. Číselné hodnoty jsou v příloze č. 11.



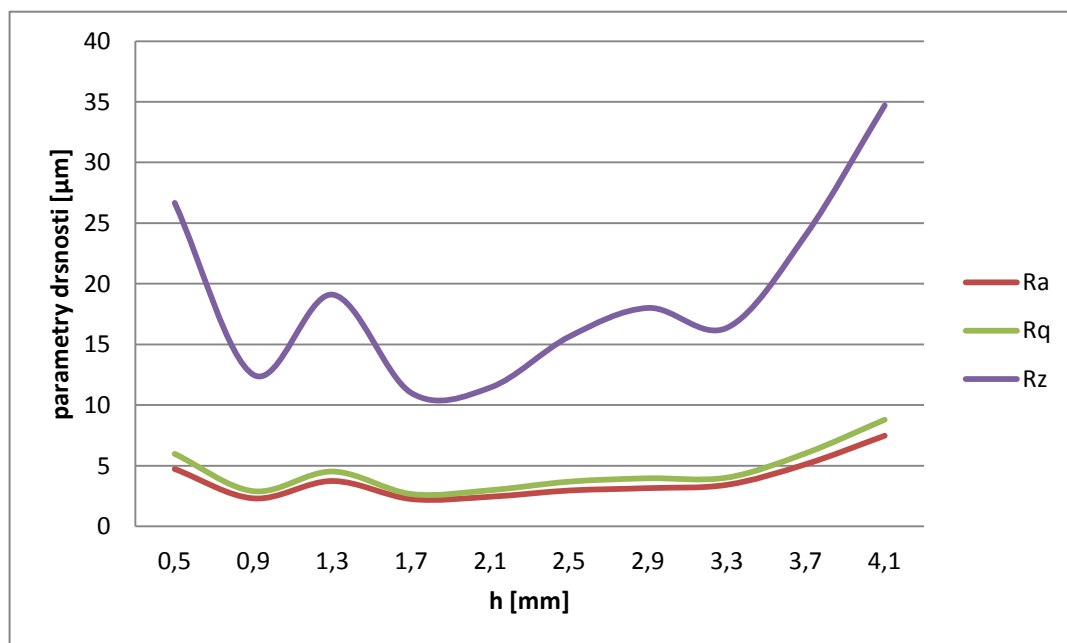
Obrázek 28: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 10

Parametry drsnosti Ra , Rz a Rq pro vzorek č. 11 znázorňuje obrázek 29. Číselné hodnoty jsou v příloze č. 12.



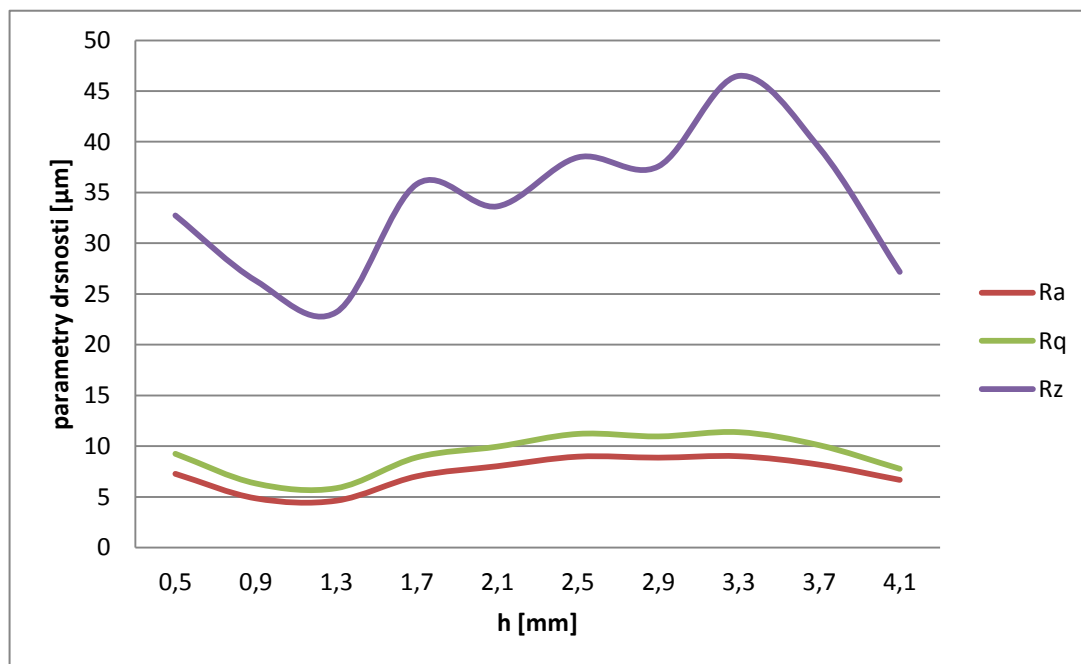
Obrázek 29: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 11

Parametry drsnosti Ra , Rz a Rq pro vzorek č. 12 znázorňuje obrázek 30. Číselné hodnoty jsou v příloze č. 13.



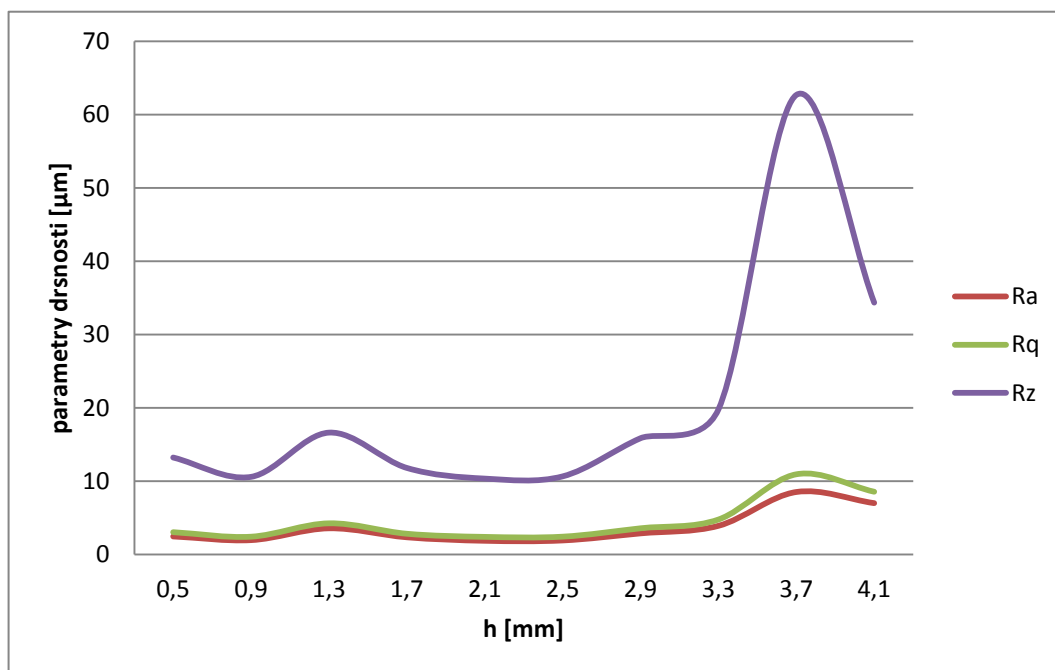
Obrázek 30: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 12

Parametry drsnosti Ra , Rz a Rq pro vzorek č. 13 znázorňuje obrázek 31. Číselné hodnoty jsou v příloze č. 14.



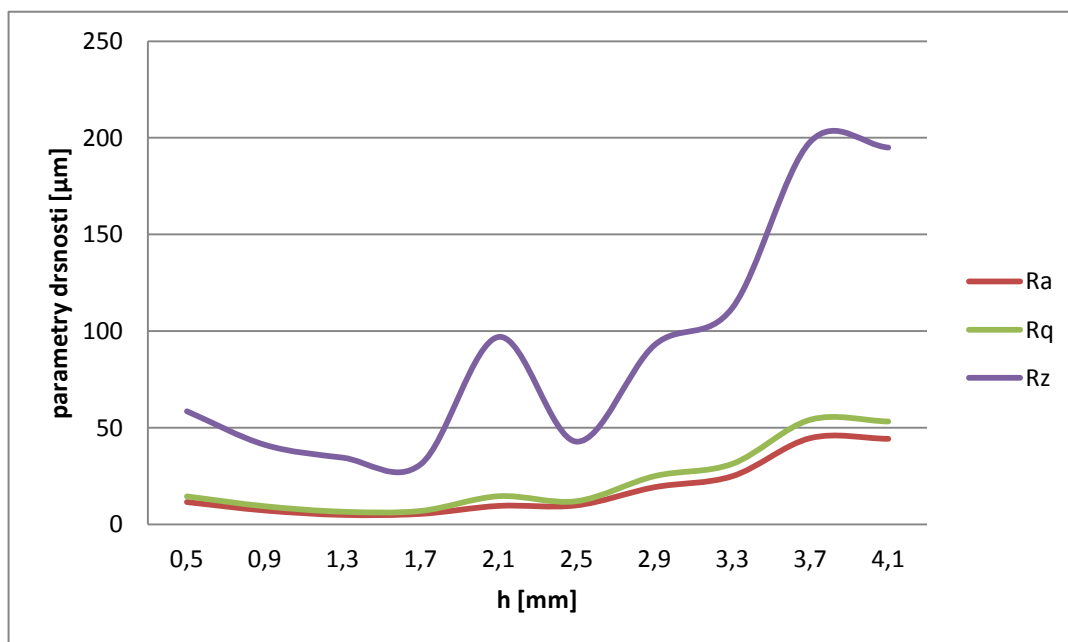
Obrázek 31: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 13

Parametry drsnosti Ra , Rz a Rq pro vzorek č. 14 znázorňuje obrázek 32. Číselné hodnoty jsou v příloze č. 15.



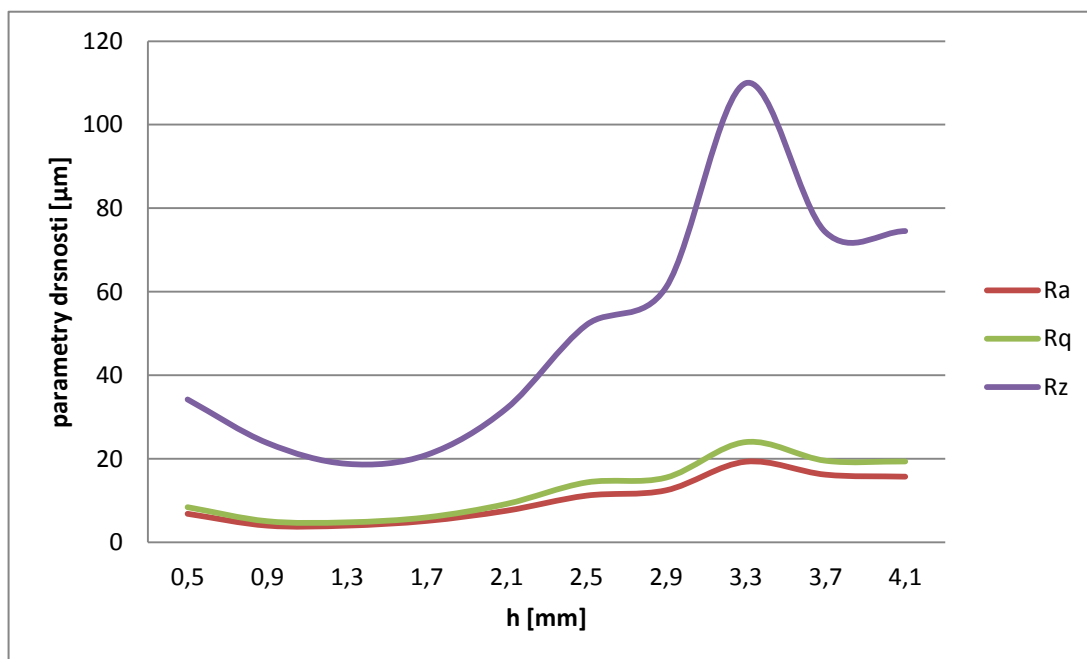
Obrázek 32: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 14

Parametry drsnosti Ra , Rz a Rq pro vzorek č. 15 znázorňuje obrázek 33. Číselné hodnoty jsou v příloze č. 16.



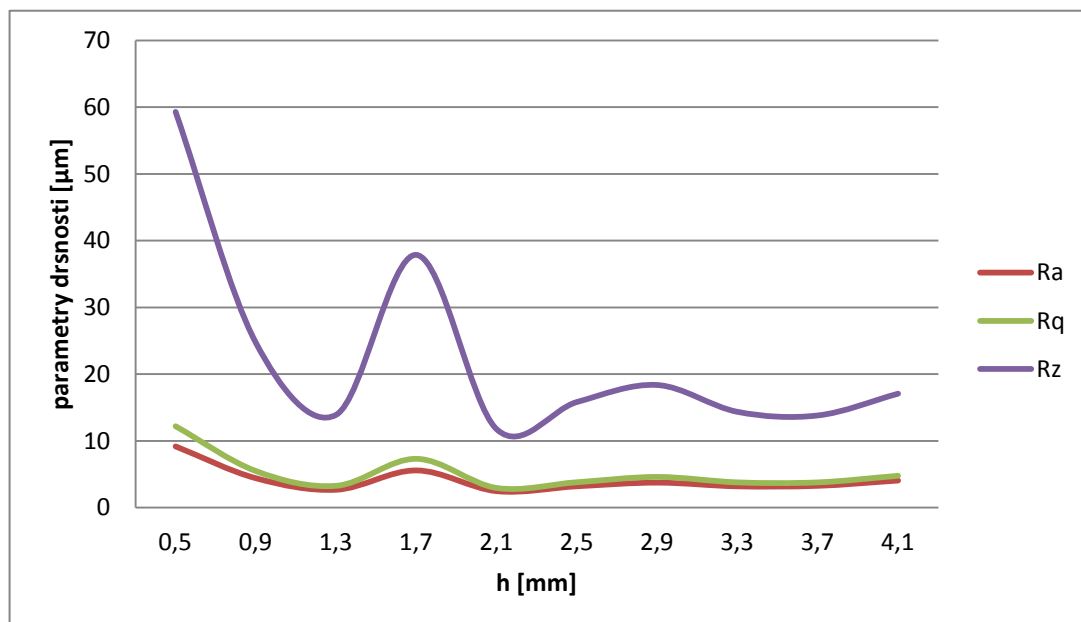
Obrázek 33: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 15

Parametry drsnosti Ra , Rz a Rq pro vzorek č. 16 znázorňuje obrázek 34. Číselné hodnoty jsou v příloze č. 17.



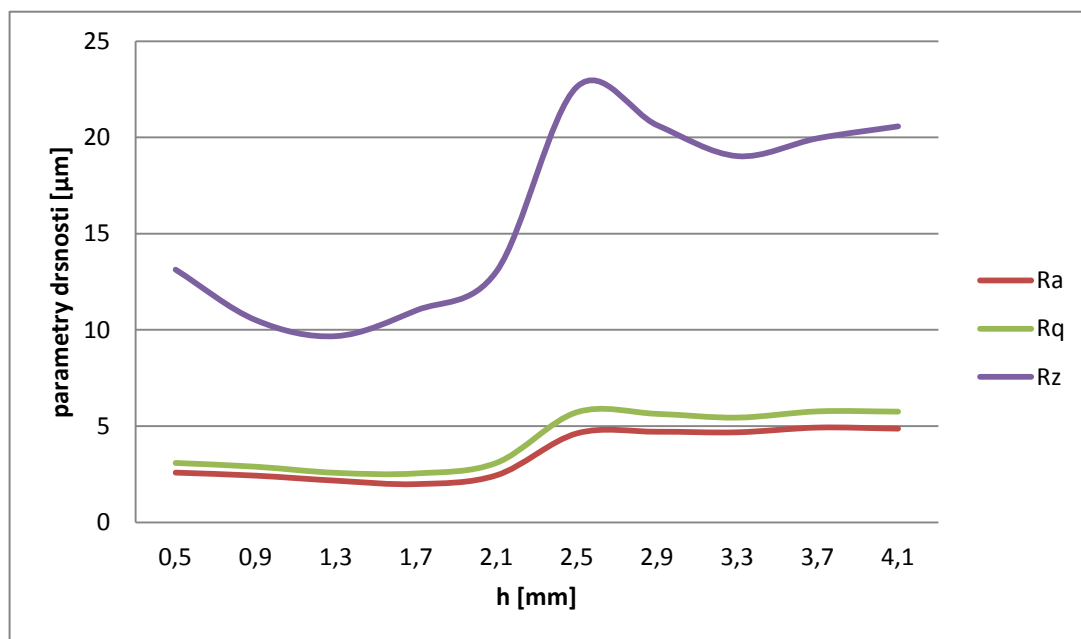
Obrázek 34: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 16

Parametry drsnosti Ra , Rz a Rq pro vzorek č. 17 znázorňuje obrázek 35. Číselné hodnoty jsou v příloze č. 18.



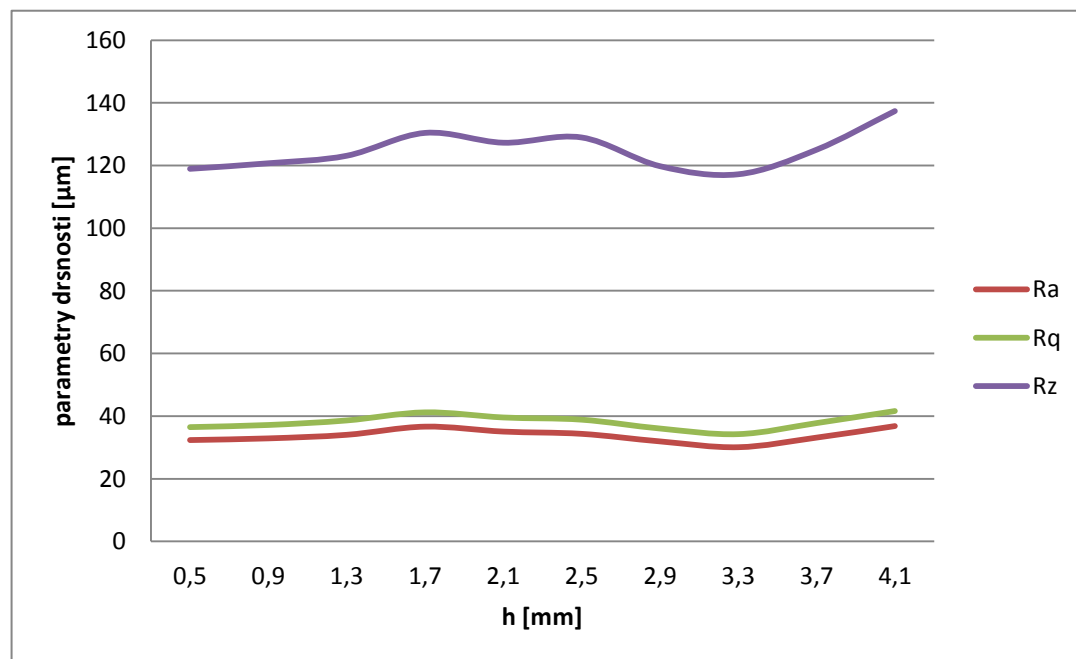
Obrázek 35: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 17

Parametry drsnosti Ra , Rz a Rq pro vzorek č. 18 znázorňuje obrázek 36. Číselné hodnoty jsou v příloze č. 19.



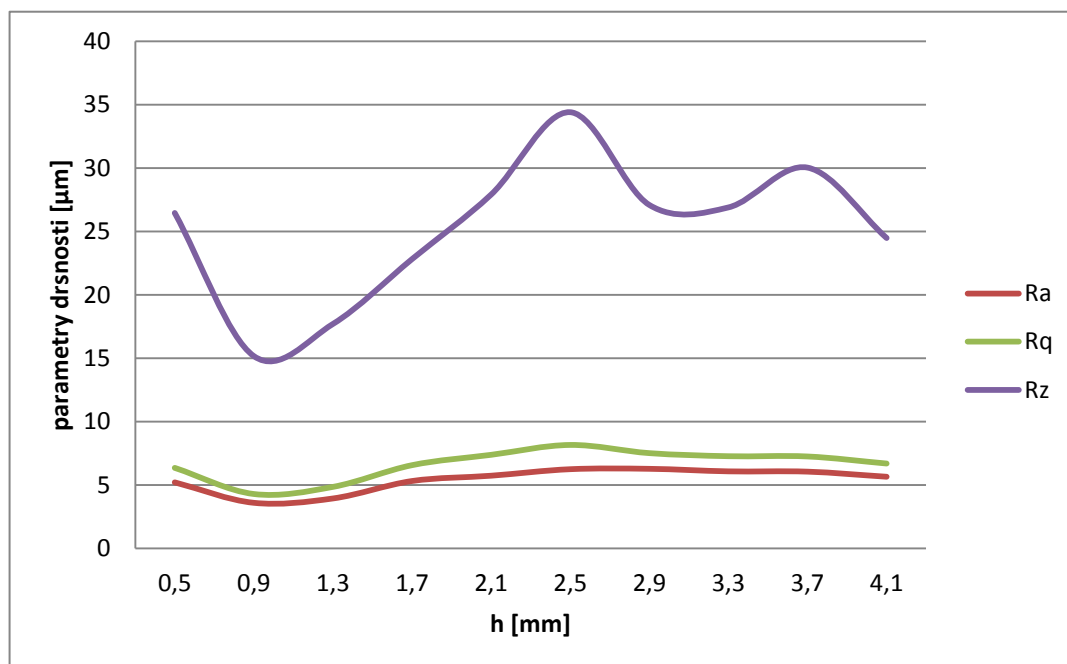
Obrázek 36: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 18

Parametry drsnosti Ra , Rz a Rq pro vzorek č. 19 znázorňuje obrázek 37. Číselné hodnoty jsou v příloze č. 20.



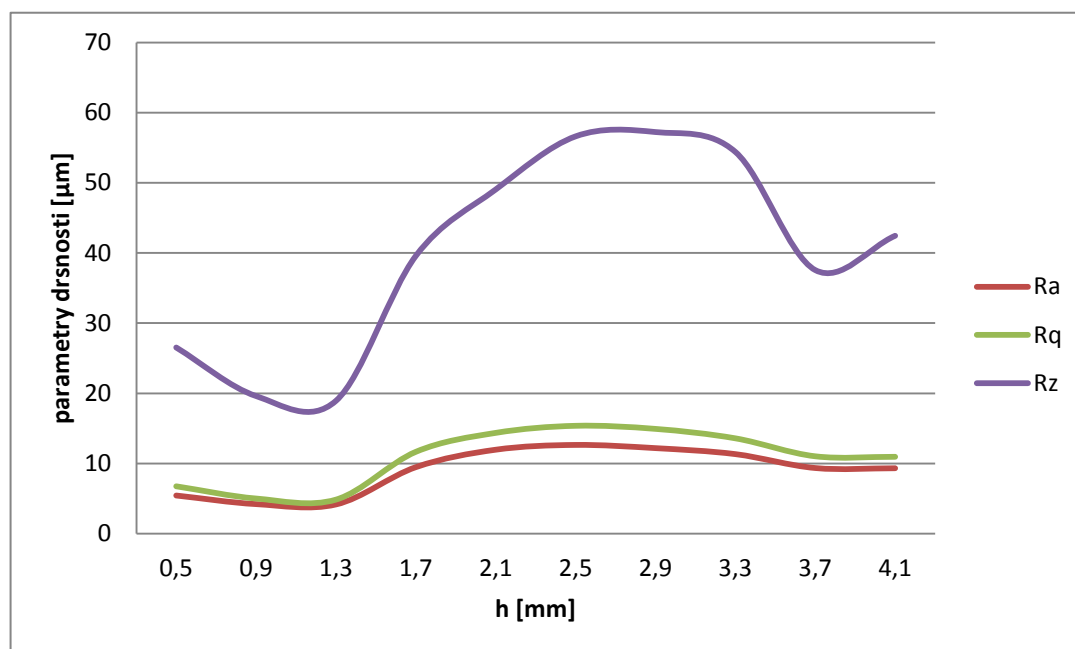
Obrázek 37: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 19

Parametry drsnosti Ra , Rz a Rq pro vzorek č. 20 znázorňuje obrázek 38. Číselné hodnoty jsou v příloze č. 21.



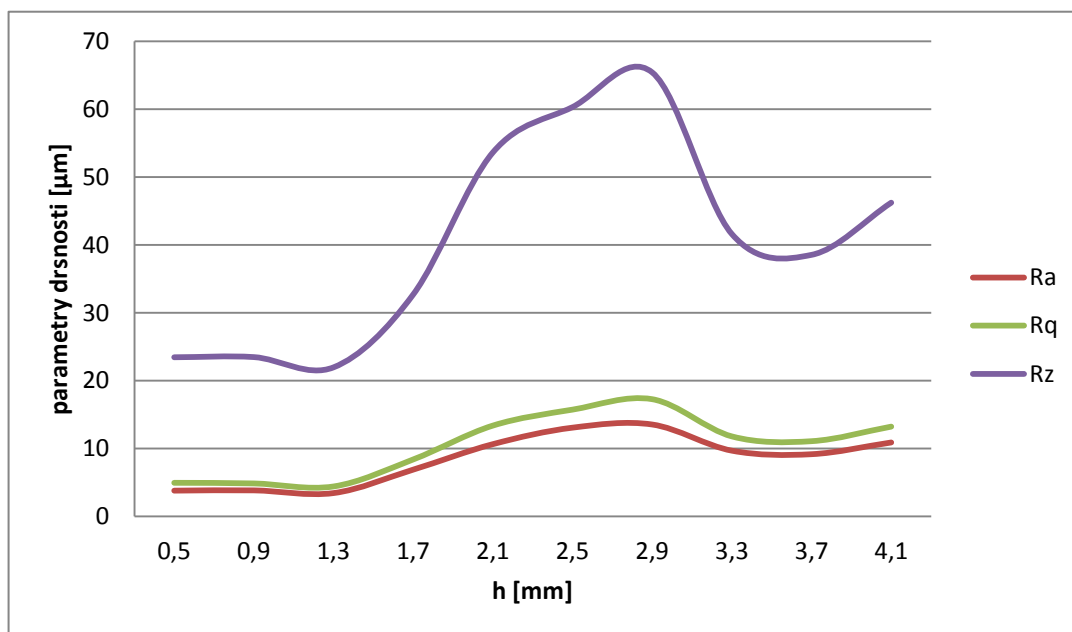
Obrázek 38: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 20

Parametry drsnosti Ra , Rz a Rq pro vzorek č. 21 znázorňuje obrázek 39. Číselné hodnoty jsou v příloze č. 22.



Obrázek 39: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 21

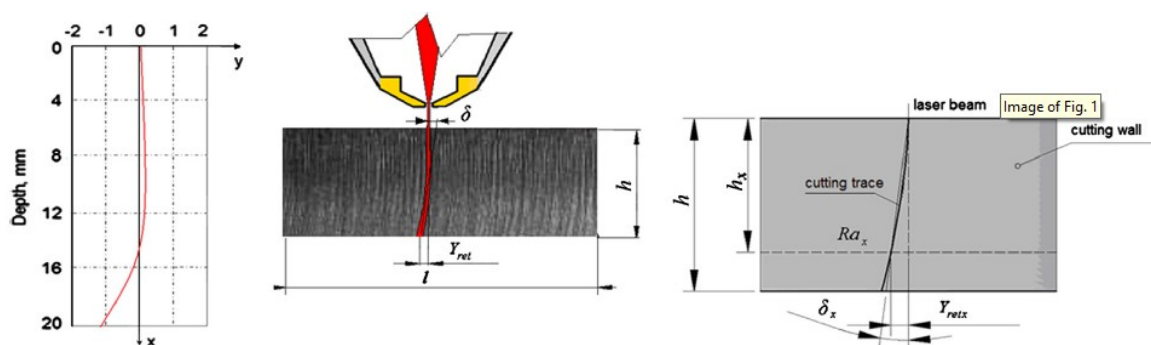
Parametry drsnosti Ra , Rz a Rq pro vzorek č. 22 znázorňuje obrázek 40. Číselné hodnoty jsou v příloze č. 23.



Obrázek 40: Průběh hodnot parametrů Ra , Rz , Rq v závislosti na rostoucí hloubce h u vzorku č. 22

7.3 Geometrické parametry drsnosti řezných stěn

Geometrické parametry popisují změnu tvaru a rozměrů deformovaného tělesa. Geometrické parametry řezné hrany u řezání CO_2 laserem znázorňuje obrázek 41. Mezi nejdůležitější geometrické parametry patří trvalé deformace. Trvalé deformace hodnotí proces podle změn fyzikálně - mechanických i podle změny vnějších rozměrů. Geometrické parametry dělíme na lineární a úhlové. Lineární parametry vyjadřují změnu lineárních rozměrů celého tělesa nebo jeho zrn. Úhlové parametry vyjadřují změnu pravých úhlů v celém tělese nebo v jeho zrnech. K posouzení celkové trvalé deformace tělesa se hodnotí geometrie stěny řezu, která vznikne po obrábění laserem [3].



Obrázek 41: Geometrické parametry řezné hrany u řezání CO_2 laserem [3]

Ve schématu na obrázku 41 je Y_{ret} odchylka stopy řezu [mm], δ úhel zakřivení stopy řezu [°], h tloušťka řezu [mm].

7.4 Analýza topografie povrchu

Pro každý vzorek byly vytvořeny grafy parametrů Ra , Rq a Rz v závislosti na rostoucí hloubce h , tedy $Ra, Rq, Rz = f(h)$. Číselné hodnoty parametrů drsnosti Ra , Rq a Rz jsou přiloženy v příloze. Při výrobě vzorků se měnily parametry rychlost řezání, výkon, ohnisková vzdálenost a šířka řezné spáry. Tyto parametry jsou snadno nastavitelné. Z grafů lze vidět, že čím byl výkon laserového zařízení nižší a řezná spára širší, tak se u vzorků objevovalo výrazné rýhování, drsnost povrchu se zvyšovala, vznikalo natavení spodní hrany. Toto je viditelné zejména u vzorku č. 15, kde hodnoty Rz překročily 190 μm . U tohoto vzorku lze vidět intenzitu přetvoření povrchu materiálu. Naopak u vzorku č. 18 dosáhla hodnota Rz maximálně 22,626 μm . Na povrchu tohoto vzorku je viditelné velmi jemné rýhování, jinak je povrch hladký a lesklý.

Optimalizací topografie povrchu vzniklého po laserovém obrábění se zabývá řada studií. V bakalářské práci je nastíněna optimalizace pomocí výpočtu entropie, kterou by se mohla návazně zabývat jiná práce. Pro stanovení, který parametr při obrábění laserovým paprskem je nejdůležitější, lze použít teorii entropie. Teorie entropie je měřítkem neuspořádanosti systému. Posuzováno vzhledem k užití pojmu entropie na určení váhy parametrů, tak parametr s vysokou hodnotou entropie má vysokou neuspořádanost, rozmanitost, proto je výraznější nebo důležitější než ostatní parametry s nižšími hodnotami entropie. Tato optimalizace je např. řešena v práci [6]. Autoři předkládají optimalizaci založenou na měření entropie pro určení optimálních řezných parametrů, které minimalizují šířku řezné spáry, odchylku stopy řezu, úhel zakřivení stopy řezu při řezání Nd – YAG laserem v pulzním režimu. Dále používají měření entropie pro stanovení optimálních parametrů při řezání CO₂ laserem, u kterého optimalizují řeznou rychlost a výkon laseru.

8. Závěr

Předložená bakalářská práce vysvětluje základy technologie řezání laserovým paprskem a následnou topografií povrchu vzniklou po řezání laserem. Cílem práce bylo stanovení vlivu fyzikálně – mechanických procesů na vzniklou topografií povrchu při laserovém obrábění materiálu. Materiálem použitým na výrobu vzorků byla běžná konstrukční ocel podle ČSN 11 375. Bylo z ní vyrobeno 22 vzorků. Vzorky byly řezány na stroji TRUMPF TruLaser 3030 a TruFlow do 4000 wattů. Velikost vzorků byla 100 mm x 60 mm a tloušťka řezaného materiálu 5 mm. Při řezání vzorků laserovým paprskem se měnily některé parametry, zejména rychlost řezání, výkon, ohnisková vzdálenost a šířka řezné spáry. U vyrobených vzorků se měřila topografie povrchu kvantitativní metodou. Na měření byl použit kontaktní profilometr SurfTest SJ – 400. Druhem profilu pro měření byl R_{ISO} , podle ČSN EN ISO 4287 jde o R – parametr. Z naměřených parametrů drsnosti, konkrétně z průměrné aritmetické úchyly R_a , průměrné kvadratické úchyly R_q a největší výšky profilu R_z , byly vytvořeny grafy v závislosti na rostoucí hloubce h . Kapitola 6.4 se zabývá analýzou topografie povrchu a nastiňuje možnou optimalizaci pro řezání laserovým paprskem z hlediska entropie. Tato optimalizace může být námětem pro další kvalifikační práce.

Seznam použité literatury

- [1] BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL. 1989. Drsnost povrchu. 1. vyd. Praha: SNTL, 338 s. ISBN 04-252-89.
- [2] ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pojmy, definice a parametry struktury povrchu.. 1999. Praha: Český normalizační institut, 24 s.
- [3] HARNIČÁROVÁ, Marta, Jan VALÍČEK, Andreas ÖCHSNER, Radovan GRZNÁRIK, Milena KUŠNEROVÁ, Josef NEUGEBAUER a Dražan KOZAK. Predicting residual and flow stresses from surface topography created by laser cutting technology. Optics. 2013, vol. 52, s. 21-29. DOI: 10.1016/j.optlastec.2013.03.024. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2013.03.024>
- [4] HARNIČÁROVÁ, Marta. 2011. Štúdium vlastností materiálov pri rezaní laserovým lúčom. Prešov. Dizertační. Technická univerzita v Košicích.
- [5] MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie. 1. vyd. Košice: Vienala, 2000, 275 s. ISBN 80-709-9430-4.
- [6] RAO, Raghavendra a Vinod YADAVA. 2009. Multi-objective optimization of Nd: YAG laser cutting of thin superalloy sheet using grey relational analysis with entropy measurement. Optics. 41(8): 922-930. DOI: 10.1016/j.optlastec.2009.03.008. ISSN 00303992. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030399209000504>
- [7] SOCHOR, Václav. Lasery a koherentní svazky. Praha: Academia, 1990, 195 s. ISBN 80-200-0354-1.
- [8] Surftest SJ-400. 2015. Mitutoyo: America [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.mitutoyo.com/>
- [9] ŠULC, Jan. 2002. Lasery a jejich aplikace [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>
- [10] ŠULC, Jan. 2004. Průmyslové aplikace laserových systémů [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf>
- [11] TRUMPF. 2015. TRUMPF Česká republika [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/>

Seznam příloh

Příloha č. 1: Surftest 1. měření vzorek č. 2

Příloha č. 2: Tabulka s hodnotami pro vzorek 1

Příloha č. 3: Tabulka s hodnotami pro vzorek 2

Příloha č. 4: Tabulka s hodnotami pro vzorek 3

Příloha č. 5: Tabulka s hodnotami pro vzorek 4

Příloha č. 6: Tabulka s hodnotami pro vzorek 5

Příloha č. 7: Tabulka s hodnotami pro vzorek 6

Příloha č. 8: Tabulka s hodnotami pro vzorek 7

Příloha č. 9: Tabulka s hodnotami pro vzorek 8

Příloha č. 10: Tabulka s hodnotami pro vzorek 9

Příloha č. 11: Tabulka s hodnotami pro vzorek 10

Příloha č. 12: Tabulka s hodnotami pro vzorek 11

Příloha č. 13: Tabulka s hodnotami pro vzorek 12

Příloha č. 14: Tabulka s hodnotami pro vzorek 13

Příloha č. 15: Tabulka s hodnotami pro vzorek 14

Příloha č. 16: Tabulka s hodnotami pro vzorek 15

Příloha č. 17: Tabulka s hodnotami pro vzorek 16

Příloha č. 18: Tabulka s hodnotami pro vzorek 17

Příloha č. 19: Tabulka s hodnotami pro vzorek 18

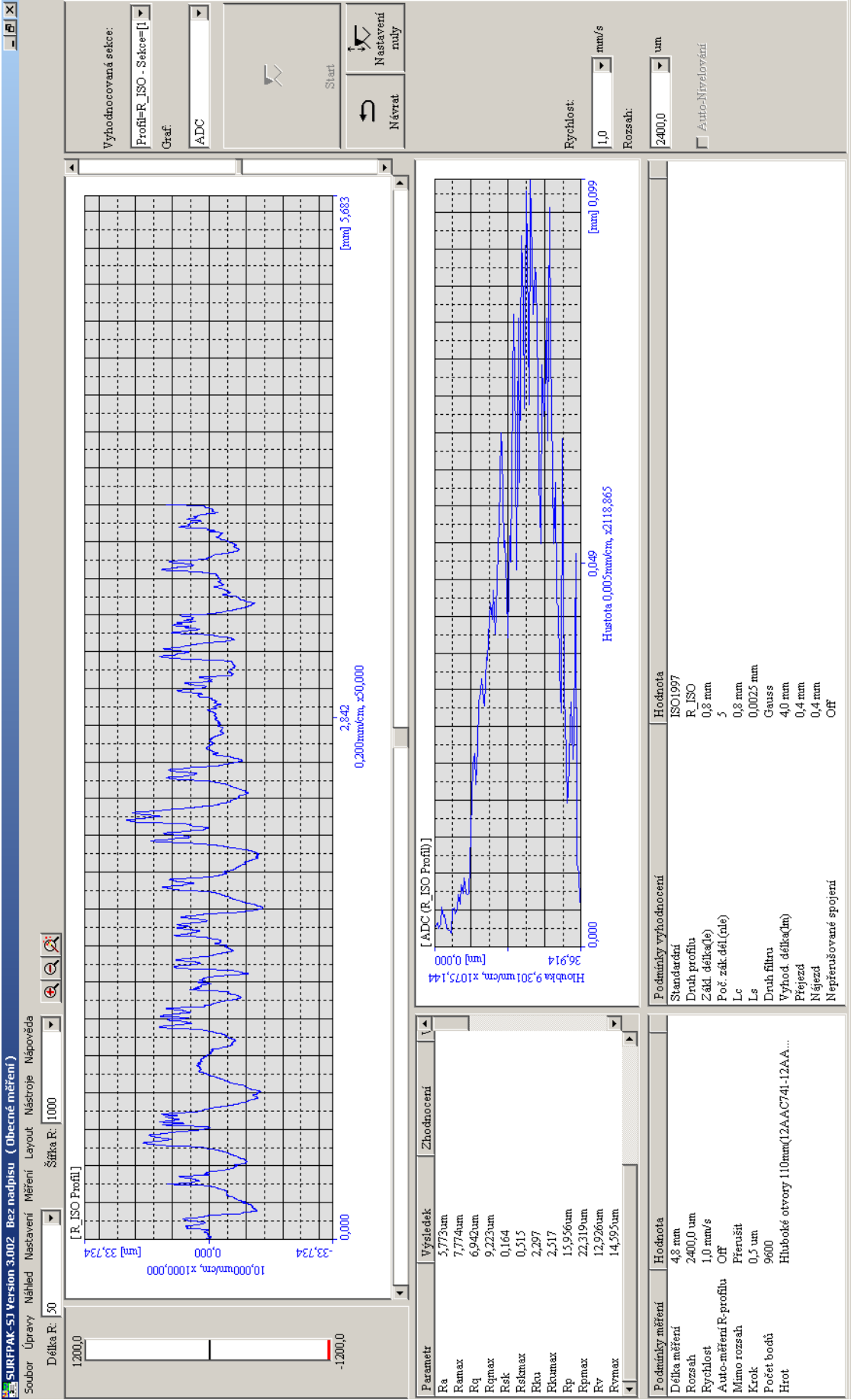
Příloha č. 20: Tabulka s hodnotami pro vzorek 19

Příloha č. 21: Tabulka s hodnotami pro vzorek 20

Příloha č. 22: Tabulka s hodnotami pro vzorek 21

Příloha č. 23: Tabulka s hodnotami pro vzorek 22

Příloha č. 1: Surftest 1. měření vzorek č. 2



Příloha č. 2: Tabulka s hodnotami pro vzorek 1

h [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,5	4,912	6,379	29,966
0,9	2,624	3,225	13,974
1,3	2,975	3,583	15,745
1,7	2,04	2,483	10,782
2,1	3,543	4,218	16,612
2,5	3,151	3,651	13,606
2,9	3,087	3,685	15,273
3,3	3,209	3,821	15,336
3,7	10,507	15,447	90,784
4,1	3,547	4,316	19,003

Příloha č. 3: Tabulka s hodnotami pro vzorek 2

h [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,5	5,773	6,942	28,882
0,9	2,783	3,492	17,914
1,3	2,158	2,619	11,75
1,7	5,556	6,999	33,301
2,1	2,649	3,393	14,805
2,5	3,165	4,15	18,898
2,9	3,056	3,857	15,997
3,3	3,781	4,64	19,668
3,7	4,959	5,899	22,785
4,1	6,139	7,446	30,851

Příloha č. 4: Tabulka s hodnotami pro vzorek 3

h [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,5	5,981	7,482	31,41
0,9	3,148	3,731	16,177
1,3	2,297	2,818	12,786
1,7	3,061	3,853	16,695
2,1	3,24	4,026	18,766
2,5	3,784	4,855	22,995
2,9	2,795	3,426	13,698
3,3	3,048	3,757	17,494
3,7	3,786	4,715	20,839
4,1	2,804	3,406	14,387

Příloha č. 5: Tabulka s hodnotami pro vzorek 4

h [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,5	6,735	8,127	36,226
0,9	3,476	4,393	22,444
1,3	2,471	2,937	12,456
1,7	5,824	7,457	37,063
2,1	3,012	3,732	15,985
2,5	3,523	4,499	22,053
2,9	3,66	4,899	24,778
3,3	4,053	5,258	22,904
3,7	2,234	3,006	12,994
4,1	2,938	3,642	15,263

Příloha č. 6: Tabulka s hodnotami pro vzorek 5

h [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,5	12,453	16,801	60,346
0,9	6,788	8,876	42,882
1,3	5,362	6,69	28,552
1,7	8,345	10,691	39,394
2,1	9,429	12,715	48,541
2,5	8,624	11,665	43,73
2,9	7,719	10,136	44,959
3,3	6,627	8,058	27,864
3,7	6,069	7,417	29,711
4,1	6,527	7,908	34,596

Příloha č. 7: Tabulka s hodnotami pro vzorek 6

h [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,5	11,093	13,374	55,972
0,9	4,611	5,753	23,542
1,3	5,292	6,772	30,742
1,7	7,724	9,591	40,241
2,1	6,981	8,483	33,106
2,5	7,781	9,499	39,528
2,9	7,09	8,528	34,472
3,3	5,395	6,435	25,202
3,7	3,974	4,856	20,42
4,1	4,621	5,866	26,712

Příloha č. 8: Tabulka s hodnotami pro vzorek 7

h [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,5	5,49	6,927	29,207
0,9	2,755	3,268	12,609
1,3	2,383	2,909	12,944
1,7	2,986	3,614	14,278
2,1	3,337	4,077	18,502
2,5	3,082	3,873	17,013
2,9	3,347	4,018	16,945
3,3	3,464	4,111	15,903
3,7	3,992	4,939	21,316
4,1	6,475	7,888	33,707

Příloha č. 9: Tabulka s hodnotami pro vzorek 8

h [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,5	6,292	7,481	29,236
0,9	4,973	6,63	28,913
1,3	5,913	7,66	37,901
1,7	2,284	2,712	10,97
2,1	4,159	5,137	26,123
2,5	3,042	3,715	15,949
2,9	3,749	4,718	21,299
3,3	3,954	5,1	26,65
3,7	3,082	3,817	15,304
4,1	5,985	7,442	36,277

Příloha č. 10: Tabulka s hodnotami pro vzorek 9

h [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,5	9,41	11,686	50,321
0,9	6,603	8,098	35,287
1,3	6,007	7,326	29,778
1,7	7,303	9,028	35,914
2,1	6,884	8,477	32,868
2,5	7,42	8,804	33,927
2,9	5,573	6,799	26,652
3,3	4,753	5,651	21,873
3,7	4,551	5,582	25,323
4,1	4,197	5,115	22,119

Příloha č. 11: Tabulka s hodnotami pro vzorek 10

h [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,5	19,167	23,429	90,752
0,9	13,725	17,023	69,884
1,3	10,964	13,714	58,33
1,7	8,837	11,211	48,973
2,1	10,61	12,751	51,258
2,5	12,237	14,077	49,534
2,9	13,606	15,852	57,057
3,3	11,481	13,676	52,739
3,7	8,763	10,65	44,659
4,1	5,541	6,433	23,31

Příloha č. 12: Tabulka s hodnotami pro vzorek 11

h [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,5	5,6	6,804	29,418
0,9	2,211	2,787	12,433
1,3	1,807	2,256	8,785
1,7	2,236	2,757	11,312
2,1	1,317	1,633	7,25
2,5	1,475	1,857	9,692
2,9	1,987	2,505	10,587
3,3	3,32	4,023	16,552
3,7	4,62	5,659	23,014
4,1	5,704	7,102	28,541

Příloha č. 13: Tabulka s hodnotami pro vzorek 12

h [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,5	4,74	5,982	26,675
0,9	2,318	2,897	12,489
1,3	3,751	4,523	19,109
1,7	2,263	2,66	10,994
2,1	2,455	2,979	11,444
2,5	2,966	3,687	15,641
2,9	3,163	3,964	18,012
3,3	3,437	4,022	16,371
3,7	5,139	6,04	24,04
4,1	7,486	8,808	34,721

Příloha č. 14: Tabulka s hodnotami pro vzorek 13

h [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,5	7,26	9,236	32,733
0,9	4,854	6,307	26,298
1,3	4,625	5,844	23,198
1,7	7,02	8,887	35,83
2,1	8,011	9,942	33,631
2,5	8,948	11,203	38,461
2,9	8,85	10,951	37,569
3,3	8,99	11,372	46,493
3,7	8,162	10,086	39,399
4,1	6,666	7,755	27,171

Příloha č. 15: Tabulka s hodnotami pro vzorek 14

h [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,5	2,451	3,014	13,216
0,9	1,949	2,401	10,58
1,3	3,558	4,224	16,609
1,7	2,334	2,798	11,794
2,1	1,857	2,373	10,343
2,5	1,905	2,402	10,646
2,9	2,867	3,546	15,846
3,3	3,896	4,741	19,768
3,7	8,51	10,912	62,642
4,1	6,988	8,532	34,332

Příloha č. 16: Tabulka s hodnotami pro vzorek 15

h [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,5	11,622	14,474	58,534
0,9	7,283	9,388	41,171
1,3	5,002	6,552	34,541
1,7	5,531	6,963	31,114
2,1	9,641	14,592	96,962
2,5	9,924	12,008	42,825
2,9	19,29	24,975	92,762
3,3	24,993	31,356	112,049
3,7	44,658	54,171	197,963
4,1	44,295	53,262	194,933

Příloha č. 17: Tabulka s hodnotami pro vzorek 16

h [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,5	6,846	8,43	34,24
0,9	4,013	5,073	23,827
1,3	4,014	4,807	18,835
1,7	5,147	6	20,996
2,1	7,591	9,205	32,101
2,5	11,198	14,336	52,046
2,9	12,479	15,501	61,062
3,3	19,339	24,001	109,923
3,7	16,236	19,543	74,273
4,1	15,752	19,364	74,536

Příloha č. 18: Tabulka s hodnotami pro vzorek 17

h [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,5	9,163	12,161	59,298
0,9	4,401	5,472	24,682
1,3	2,674	3,269	13,891
1,7	5,568	7,3	37,858
2,1	2,463	2,949	11,721
2,5	3,193	3,802	15,809
2,9	3,738	4,594	18,355
3,3	3,184	3,784	14,331
3,7	3,262	3,784	13,791
4,1	4,052	4,767	17,057

Příloha č. 19: Tabulka s hodnotami pro vzorek 18

h [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,5	2,592	3,081	13,132
0,9	2,435	2,886	10,51
1,3	2,173	2,567	9,682
1,7	1,997	2,538	11,021
2,1	2,456	3,091	13,058
2,5	4,623	5,721	22,626
2,9	4,707	5,633	20,627
3,3	4,678	5,439	19,024
3,7	4,923	5,764	19,952
4,1	4,867	5,749	20,569

Příloha č. 20: Tabulka s hodnotami pro vzorek 19

h [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,5	32,346	36,451	118,889
0,9	32,884	37,14	120,667
1,3	34,02	38,586	123,061
1,7	36,615	41,167	130,361
2,1	35,046	39,539	127,228
2,5	34,326	38,827	128,904
2,9	31,925	36,008	119,745
3,3	30,068	34,215	117,152
3,7	33,13	37,743	124,988
4,1	36,796	41,59	137,322

Příloha č. 21: Tabulka s hodnotami pro vzorek 20

h [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,5	5,205	6,347	26,45
0,9	3,596	4,286	15,162
1,3	3,939	4,847	17,698
1,7	5,31	6,559	22,813
2,1	5,729	7,375	27,903
2,5	6,24	8,151	34,399
2,9	6,27	7,506	27,083
3,3	6,07	7,265	26,889
3,7	6,047	7,244	30,029
4,1	5,646	6,686	24,472

Příloha č. 22: Tabulka s hodnotami pro vzorek 21

h [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,5	5,441	6,757	26,513
0,9	4,211	5,017	19,595
1,3	4,165	4,861	18,919
1,7	9,49	11,664	39,574
2,1	11,981	14,358	49,036
2,5	12,665	15,364	56,604
2,9	12,206	14,923	57,213
3,3	11,35	13,58	54,383
3,7	9,364	11,024	37,547
4,1	9,334	10,953	42,436

Příloha č. 23: Tabulka s hodnotami pro vzorek 22

h [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,5	3,779	4,966	23,451
0,9	3,818	4,872	23,475
1,3	3,419	4,429	21,968
1,7	6,882	8,406	32,703
2,1	10,645	13,388	53,632
2,5	13,079	15,735	60,314
2,9	13,543	17,27	65,416
3,3	9,679	11,796	41,597
3,7	9,159	11,092	38,542
4,1	10,893	13,235	46,228